

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**PROCEDIMENTOS APLICÁVEIS À
GARANTIA DA QUALIDADE METROLÓGICA
DOS RESULTADOS NA TERMOMETRIA
AUTOMATIZADA COM TERMOPAR E
SENSORES RESISTIVOS**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

DENISE DAS MERCÊS CAMARANO

FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO DE 1993.

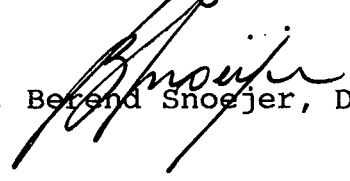
PROCEDIMENTOS APLICÁVEIS À GARANTIA DA QUALIDADE METROLÓGICA DOS
RESULTADOS NA TERMOMETRIA AUTOMATIZADA COM TERMOPAR E SENSORES
RESISTIVOS

DENISE DAS MERCÊS CAMARANO

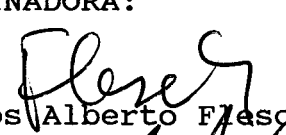
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA

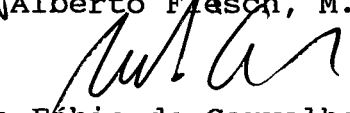
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA - ÁREA DE CONCENTRAÇÃO -
METROLOGIA E AUTOMAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.

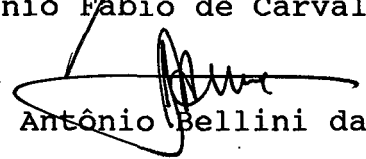
 Prof. Carlos Alberto Flesch, M. Eng. - Orientador


 Prof. Bernd Snoejer, Dr. Ing. - Coordenador do curso

BANCA EXAMINADORA:

 Prof. Carlos Alberto Flesch, M. Eng.

 Prof. Antônio Fábio de Carvalho, Dr. Eng.

 Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr.

 Eng^o. Nelson Schoeler, M. Eng.

Aos meus pais
Suely de A. Camarano (in memorian)
Rosalvo P. Camarano

Aos meus irmãos e irmãs

Ao meu namorado
Clóvis André Lüdtkke

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Carlos Alberto Flesch pela orientação e dedicação na realização do trabalho.

A José Eustáquio da Silva pelo apoio e orientação prestada no trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, ao Labmetro - Laboratório de Metrologia e Automação e a Fundação Certi por terem oferecidos condições para elaboração deste trabalho.

Ao programa RHAЕ (Recursos Humanos em Áreas Estratégicas do CNPq) e a Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC pela concessão da bolsa de estudos.

Aos estagiários José Paulo Alves pelo apoio na edição e Alexandre Sanchez Martins pela implementação do aplicativo computacional.

A Mônica Fünfgelt.

Aos meus amigos.

SUMÁRIO

	Pág.
RESUMO	i
ABSTRACT	ii
SIMBOLOGIA	iii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. LOCALIZAÇÃO NO CONTEXTO TÉCNICO-CIENTÍFICO	1
1.2. OBJETIVO DO TRABALHO	2
1.3. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	3
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2. TRANSDUÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS NA TERMOMETRIA COM TRANSDUTORES ELÉTRICOS	7
2.1. TRANSDUTORES ELÉTRICOS DE TEMPERATURA	9
2.1.1. Termopar	9
2.1.2. Sensores Resistivos	22
2.2. CIRCUITOS USUAIS NA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA COM TRANSDUTORES ELÉTRICOS	30
2.2.1. Medição de Pequenas Tensões	30
2.2.2. Medição de Resistência	33
2.3. AUTOMAÇÃO DA AQUISIÇÃO DE SINAL	37
2.3.1. Chaveamento de Sinais	38
2.3.2. Condicionamento de Sinais	40
3. MODELAGEM DA CADEIA DE MEDIÇÃO NA TERMOMETRIA COM AQUISIÇÃO AUTOMATIZADA	44
3.1. SISTEMAS DE MEDIÇÃO ELÉTRICOS	45
3.1.1. Fontes de Erros Comuns aos Sistemas de Medição Elétricos	45
3.1.2. Fontes de Erros Específicas da Automação ..	53
3.2. FONTES DE ERROS ADICIONAIS	56
3.2.1. Fontes de Erros Características dos	

Transdutores Elétricos	56
3.2.2. Fontes de Erros Relacionados com a Aplicação	62
3.3. PROPOSTA DE MODELO PARA ANÁLISE DE ERROS	63
3.3.1. Modelo Elétrico Equivalente para Termopares	64
3.3.2. Modelo Elétrico Equivalente para Termômetros Resistivos	66
4. METODOLOGIA PARA AJUSTE DE INTERVALOS DE CALIBRAÇÃO DE TRANSDUTORES ELÉTRICOS	73
4.1. ASPECTOS A CONSIDERAR NO ESTABELECIMENTO DE INTERVALOS DE CALIBRAÇÃO	74
4.1.1. Intervalo de Calibração Inicial	81
4.1.2. Métodos de Revisar Intervalos de Calibração	83
4.2. METODOLOGIA PARA AJUSTAR O INTERVALO DE CALIBRAÇÃO	87
4.2.1. Etapa de Caracterização	88
4.2.2. Etapa de Tomada de Decisão	91
5. PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DOS MÓDULOS FÍSICOS E LÓGICOS DE PROCESSO AUTOMATIZADOS NA TERMOMETRIA COM TRANSDUTORES ELÉTRICOS	96
5.1. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	97
5.1.1. Fase de Caracterização do Problema	98
5.1.2. Fase de Configuração	104
5.2. APLICATIVO COMPUTACIONAL (SISTEMA DE SELEÇÃO)	106
5.2.1. Estrutura do Aplicativo Computacional	107
5.2.2. Teste e Avaliação Geral do Sistema de Seleção (protótipo)	111
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

RESUMO

A crescente exigência em termos de qualidade implica, nas mais diversas áreas do conhecimento, a necessidade de incertezas baixas, e em especial asseguradas. Aí tem destaque o problema da medição automatizada de temperatura, frente à grande incidência prática de tal situação e a elevada importância da temperatura como parâmetro principal de interferência na maioria dos processos.

São enfocados neste trabalho dois itens que se complementam dentro do contexto da obtenção de resultados com confiabilidade metrológica assegurada na termometria automatizada: a incerteza de medição global do processo de medição, incluídos os meios físicos e o concernente procedimento operacional; e, a garantia da qualidade dos instrumentos empregados na composição de cada particular sistema de medição.

O primeiro deles é tratado através de modelamento matemático da cadeia de medição, considerando do transdutor ao conversor analógico/digital, bem como as principais fontes de erros inerentes aos módulos e decorrentes de suas interligações e da integração com o meio. O modelamento adotado serve de base para a implementação de um aplicativo computacional para seleção de instrumentos e auxílio ao estabelecimento de procedimentos, ambos aplicáveis na otimização do processo automatizado de medição de temperatura frente às exigências de cada particular aplicação.

O segundo item, é focado sob a óptica do procedimento experimental, como forma de assegurar o conhecimento das reais incertezas de medição dos instrumentos. Neste contexto, o trabalho se preocupa, em especial, com o problema da determinação do tamanho ótimo dos intervalos de calibração. Integrando e complementando propostas genéricas de diversos autores, é proposto um procedimento de auxílio à determinação de intervalos ótimos, ajustáveis, de calibração de termopares, termorresistores e termistores.

ABSTRACT

The growing demand in quality terms has brought about to a great diversity of knowledge areas the need of low uncertainties, especially guaranteed ones. Here, the problem of automated temperature measurement can be highlighted due to the important practical consequences of such situation and the sudden relevance as a main interference temperature parameter in most of the processes.

Two complementary items are approached within the context of the obtention of results with metrology reliability assured in the automated thermometry: the uncertainty as regards the global measurement of the measuring process, included the physical means and what is related to the operational process; and, the guarantee of the quality of the tools used to compose each particular measuring system.

The first of them is dealt with through the measurement mathematical modelling chain, considering from the transducers to the analog/digital converter, the main sources of errors inherent to the modules, and their interlinkages and of the integration with the environment. The adopted model serves as basis to implement a computational applicative of procedures, both applicable to the optimization of the temperature measurement automated process, in view of the demands of each particular application.

The second item, is approached from the experimental procedure view, as a way of assuring the knowledge of the real uncertainty of total measurement. In this context, the work is especially concerned with of problem of the determination of the optimal size of the calibration intervals. Integrating and complementing generic proposals from different authors, a procedure is proposed here, that, can help to determine the optimal intervals, adjustable, to the calibration of thermocouples, resistance detectors temperature and thermistors.

SIMBOLOGIA

$C_{is}...$	capacitância entre os fios de ligação
$CI...$	capacitância entre <i>high</i> e <i>low</i>
$Cdif...$	capacitâncias combinadas $[(N+1) \times CI]$
$Cv...$	capacitância de entrada da unidade de condicionamento de sinal
$C...$	capacitância equivalente $[=Cdif+Cis+Cv]$
$I...$	corrente fornecida pela fonte de corrente
$Iof...$	corrente de fuga
$Iofdif...$	corrente de fuga combinada $[=N \times Iof]$
$Iofs...$	corrente de <i>offset</i>
$Irt'...$	corrente através de R_t
$It...$	corrente total $[=Iofdif+Ioffset]$
$\%I...$	queda da corrente fornecida pela fonte de corrente em porcentagem
$J...$	junções termoelétricas
$N...$	número de canais
$Rc...$	resistência de contato fechado da chave
$Rdif...$	resistências combinadas $[=RI/(N+1)]$
$Ret...$	resistência equivalente do transdutor
$Rf...$	resistência dos fios de ligação
$Ri...$	resistência da fonte de corrente
$R_{is}...$	resistência da isolação dos fios de ligação
$RI...$	resistência entre o <i>high</i> e <i>low</i>
$Rjf...$	resistência da junção de referência
$Rpar...$	resistência em paralelo $[=Rdif \text{ paralelo a } R_{is} \text{ e } R_v]$
$Rth...$	resistência equivalente Thèvenin do circuito considerado $[=R_t+2R_f+2R_c]$
$Rv...$	resistência de entrada do condicionador de sinal
$Vdofs...$	tensão devida ao <i>drift</i> de <i>offset</i>
$VdG...$	tensão devida ao <i>drift</i> do ganho
$Vjf...$	tensão da junção de referência
$Vofs...$	tensão de <i>offset</i>
$Vr...$	tensão de ruído
$VRc...$	tensão de <i>offset</i> $[=2R_c \times Iofdif]$
$VRf...$	tensão de <i>offset</i> $[=2R_f \times Iofdif]$
$VRt...$	tensão sobre o transdutor
$Vt...$	tensão termoelétrica diferencial da chave
$S_s...$	sensibilidade do sensor

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. LOCALIZAÇÃO NO CONTEXTO TÉCNICO-CIENTÍFICO

Temperatura é uma grandeza que ocupa lugar de destaque no universo da metrologia. De todos os tipos de transdutores utilizados, da ordem de 15% são transdutores de temperatura. De fato, temperatura é um parâmetro fundamental na maioria dos processos físicos, sendo que em torno de 60% dos parâmetros controlados estão associados com ela. Destes 15%, 70 a 80% são termopares e sensores resistivos /1/. Com certeza tal percentual é ainda maior no âmbito da termometria automatizada.

Os termopares são até então, os transdutores mais utilizados na medição automatizada de temperatura. Isto se deve ao fato de possuírem diversas vantagens: fisicamente, são simples, podem ser flexíveis, robustos e geralmente são de fácil instalação e manuseio; além de possuírem boa resposta dinâmica, ampla faixa de operação e serem transdutores ativos.

Recentemente, com as exigências crescentes em termos de incerteza de medição, nas diversas áreas da ciência e tecnologia, e à disponibilidade de transdutores resistivos metálicos (termorresistores), significativamente robustos, para aplicação em campo e de custo reduzido, tais transdutores passaram a ocupar

maior espaço na medição automatizada de temperatura, especialmente, em bancadas de ensaio e em sistemas de controle. Cresceu também, em especial na década de 90, a utilização de transdutores resistivos semicondutores (termistores). Isto se deu pelas mesmas razões dos termorresistores, somado ao fato de que a não linearidade, característica marcante dos termistores, deixou de ter significativa importância com a capacidade de processamento trazida pela utilização de processadores eletrônicos junto aos sistemas de medição.

O rápido desenvolvimento da eletrônica, trouxe consigo a possibilidade mais larga a implementação de instrumentos microprocessados (computadorizados); mais eficientes para a medição de temperatura. Em termos de sistemas computadorizados de aquisição de sinais, atualmente o mercado oferece as opções de encadear diferentes módulos de um sistema de aquisição, de uso geral para configurar um aplicativo; ou, utilizar um de aplicação dirigida, oferecido por fabricantes especializados em certos segmentos da metrologia. Com a crescente tendência à padronização de *hardwares* e *softwares* de sistemas de aquisição de sinais vai se tornando cada vez mais interessante, técnica e economicamente, a opção por um sistema configurado a partir de produtos modulares genéricos, podendo ser, inclusive, de diferentes fabricantes.

1.2. OBJETIVO DO TRABALHO

O principal objetivo do trabalho é estabelecer procedimentos metódicos que contribuam à análise qualitativa e quantitativa das incertezas inerentes à cadeia de medição na termometria automatizada empregando termopares e sensores resistivos.

Esse objetivo foi atingido através das seguintes macro-tarefas:

- . análise das principais fontes de erros na medição de temperatura automatizada com transdutores tipo termopar, termorresistor e termistor, com base em modelos comprovadamente válidos para as cadeias de medição típicas da termometria automatizada, do transdutor ao conversor analógico digital;
- . apresentação de um modelo genérico de análise dos erros de tais transdutores com resultados qualitativos e quantitativos da simulação da aplicação de tal modelo considerando a utilização de instrumentos com características similares às dos sistemas atualmente disponíveis no mercado;
- . caracterização dos principais aspectos na definição do intervalo de tempo entre calibrações e desenvolvimento de uma metodologia de auxílio ao ajuste de tais intervalos;
- . apresentação de forma sistematizada de uma metodologia de apoio à seleção e qualificação de processos automatizados de medição de temperatura, e implementação de um aplicativo computacional, a partir de tal metodologia.

1.3. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Há crescente exigência, por parte do mercado, de níveis de qualidade cada vez mais altos nos produtos. Como temperatura é comumente um dos parâmetros principais na maioria dos processos industriais, sua medição e controle são necessários. Entretanto, ainda é muito pouco o que se tem de recursos disponíveis em termos de procedimentos, de garantia da qualidade dos resultados na medição de temperatura. Na maioria dos processos sua avaliação é baseada em critérios subjetivos e muito restrita, frente às poucas

informações normalmente disponíveis. É imprescindível portanto a adoção de procedimentos, o mais possível padronizados, para assegurar a qualidade das medições.

Nota-se que é problemática a especificação dos módulos constituintes do sistema de medição, pois geralmente poucas são as informações acerca das características necessárias para que, com segurança estatística definida, se calcule o erro inerente à medição. Também, embora o processo de calibração seja considerado imprescindível à garantia da qualidade metrológica de instrumentos, não há uma forma sistematizada de estabelecimento de intervalos ótimos de calibração de transdutores elétricos de temperatura.

Apesar da diversidade das circunstâncias nas quais se deseja medir temperatura, o presente trabalho mostra que é possível caracterizar um processo genérico de medição por combinações de condições características repetidamente encontradas na prática.

A aplicação dos modelos e metodologias apresentados, serve para o usuário como subsídio para:

- . especificar, de forma mais adequada, o sistema automatizado de aquisição de sinais e respectiva quantificação dos erros;
- . estabelecer diretrizes gerais na definição do intervalo de calibração inicial e de ajuste de tal intervalo.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho apresenta uma abordagem sistematizada da problemática envolvida na seleção e qualificação de processos

automatizados de medição de temperatura, incluindo instrumentação e procedimentos básicos de medição.

É dada ênfase às implicações relativas à utilização de sistemas automatizados, apresentando resultados qualitativos e quantitativos acerca das principais fontes de erros. Decorrem recomendações para minimizar erros e contribuir para assegurar a qualidade das medições.

O trabalho é apresentado de acordo com a seguinte estrutura:

- . o capítulo 1 enfoca a origem, objetivos, a importância do trabalho e sua aplicabilidade, além de apresentar as etapas de seu desenvolvimento;
- . o capítulo 2 apresenta uma abordagem conceitual dos transdutores elétricos tipos termopar e sensores resistivos, princípio de funcionamento, características metrológicas, operacionais, circuitos usuais na termometria com tais transdutores e automação da aquisição de sinais;
- . o capítulo 3 descreve as principais fontes de erros inerentes à cadeia de medição e apresenta um modelo para facilitar a análise e quantificar tais erros;
- . o capítulo 4 apresenta os aspectos relevantes na determinação do intervalo de calibração e propõe uma metodologia de ajuste de tais intervalos;
- . o capítulo 5 apresenta uma proposta de metodologia para seleção de um processo de medição de temperatura automatizado e um protótipo de aplicativo computacional desenvolvido a partir de tal metodologia;

. o capítulo 6 tece comentários finais sobre o desenvolvimento da dissertação na forma de conclusões e à continuidade deste trabalho.

A terminologia adotada no decorrer do trabalho está de acordo com o estabelecido pelo INMETRO /2/, complementado pelas normas ABNT /3/, ASTM /4/ e BSI /5/.

CAPÍTULO 2

TRANSDUÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS NA TERMOMETRIA COM TRANSDUTORES ELÉTRICOS

Temperatura está relacionada com a energia cinética das moléculas em uma região de um corpo qualquer, entretanto, esta energia cinética não pode ser medida diretamente. Para transpor esta dificuldade, foi definida uma escala internacional, baseada no comportamento de um número de materiais em pontos fixos termodinâmicos. A primeira escala prática foi definida em 1927 com revisões em 1948, 1954, 1960, 1968, 1976 e 1990, sendo esta a referência em temperatura atualmente.

A Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90) é definida em várias faixas e sub-faixas que se estendem de $-272,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ até acima do ponto de solidificação da prata ($961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$). De $-272,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-268,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a T_0 é definida em termos da relação temperatura-pressão vapor do ^3He e ^4He . Entre $-270,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ao ponto triplo do Neon ($-268,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) é definida por meio de um termômetro de gás de hélio calibrado em três distintas temperaturas e usando procedimentos específicos de interpolação. Do ponto triplo de equilíbrio do hidrogênio ($-259,3467\text{ }^{\circ}\text{C}$) ao ponto de solidificação da prata ($961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$) o termorresistor de platina é o instrumento

interpolador calibrado em específicos pontos fixos e procedimentos de interpolação, e acima do ponto de solidificação da prata a T_{90} é definida em termos de pontos fixos e pela lei de radiação de Planck (fig. 2.1).

Pontos Fixos	T (K)	T (°C)
Ponto de evaporação do hélio	3 a 5	-270.15 a 268.15
Ponto triplo do hidrogênio	13.8033	-259.3467
Ponto triplo do neon	24.5561	-256.15
Ponto triplo do oxigênio	54.3584	-252.85
Ponto triplo do argônio	83.8058	-248.5939
Ponto triplo do mercúrio	234.3156	-218.7916
Ponto triplo da água	273.16	0.01
Ponto de fusão do gálio	302.9146	29.7646
Ponto de solidificação do índio	429.7485	156.5985
Ponto de solidificação do estanho	505.078	231.928
Ponto de solidificação do zinco	692.677	419.527
Ponto de solidificação do alumínio	933.473	660.323
Ponto de solidificação da prata	1234.93	961.78
Ponto de solidificação do ouro	1337.33	1064.18
Ponto de solidificação do cobre	1357.77	1084.62

Figura 2.1. - Pontos fixos definidos pela ITS-90.

Há grande diversidade de instrumentos operando com base nos mais variados princípios, que são aplicados na termometria. Os mais comumente utilizados: termômetros de coluna de líquido, termopares, termômetros de resistência e pirômetros de radiação. Dentre esses, os transdutores elétricos tipos termopar e sensores resistivos (termorresistor e termistor), são em termos globais, e em especial na aquisição automatizada, os mais utilizados.

O termopar é o mais versátil de todos os termômetros. Tem sido empregado nas mais diversas aplicações, desde temperaturas extremamente baixas na faixa do oxigênio líquido ($-183\text{ }^{\circ}\text{C}$) à temperaturas próximas de $2300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (gases). Os termorresistores são principalmente utilizados como elemento padrão de calibração e em medição de temperatura em bancadas de ensaios de produtos, devido a

sua característica de estabilidade por longos períodos de tempo. Já, os termistores, são mais comumente empregados em circuitos de compensação da junção de referência de termopares e em sistemas de controle de temperatura ambiente, por causa de sua alta sensibilidade nessa faixa de temperatura.

Neste capítulo é feita uma abordagem conceitual de tais transdutores elétricos. Seu conteúdo inclui princípios, características metrológicas, operacionais e circuitos usuais de medição, além de apresentar os circuitos de condicionamento e tratamento de sinais. Tal abordagem, servirá como referencial para o levantamento de dados e realização de análises descritas nos capítulos posteriores.

2.1. TRANSDUTORES ELÉTRICOS DE TEMPERATURA

A seleção de um sistema de medição para uma dada aplicação na termometria elétrica é dependente, primeiramente, de características do transdutor. O conhecimento aprofundado de tais características é primordial para a escolha entre o melhor transdutor elétrico de temperatura (considerado no trabalho como: termopar, termorresistor e termistor).

2.1.1. Termopar

a) Fundamentos de termoeletricidade

A medição de temperatura por meio de termopares se baseia no efeito de Seebeck (1821) o qual determina que: se dois metais dissimilares forem conectados formando um circuito elétrico fechado,

com as duas junções em diferentes temperaturas, o circuito passa a ser percorrido por uma corrente elétrica gerada por uma força eletromotriz térmica (tensão termoelétrica). Esse efeito é resultante de dois fenômenos térmicos, o efeito de Peltier (1834) e efeito de Thomson (1854). O primeiro se trata da liberação ou absorção de calor quando uma corrente elétrica flui através da junção de dois condutores dissimilares. A direção da corrente determina se o calor é liberado ou absorvido. Esse efeito é reversível, independe da forma ou dimensões dos condutores que compõem as junções e é proporcional à corrente que flui pelas junções. O efeito de Peltier é diferente do efeito Joule. O efeito Joule não necessita de metais dissimilares e é função das dimensões do condutor, além de ser um fenômeno irreversível. O segundo, efeito de Thomson, mostra que calor é liberado ou absorvido num único condutor submetido a um gradiente térmico, quando é percorrido por uma corrente elétrica /7/.

Conforme o teorema fundamental da termoeletricidade, temos /7/:

$$\frac{dE_{AB}}{dT} = \frac{dP_{AB}}{dT} + (\sigma_A - \sigma_B) \quad (\text{eq. 2.1})$$

onde:

dE_{AB} ... coeficiente de Seebeck gerado pelo par AB

dP_{AB} ... coeficiente de Peltier gerado pelo par AB

σ_B, σ_A ... coeficiente de Thomson gerado no condutor B e A

A equação 2.1 mostra que o efeito de Seebeck é a soma algébrica do efeito de Peltier e Thomson. Essa equação pode ser expressa de uma maneira mais simplificada como /7/:

$$\frac{dE_{AB}}{dT} = S_A - S_B \quad (\text{eq. 2.2})$$

onde:

$$S_{A,B} = \int_0^T \frac{\sigma_{A,B}}{T} dT \quad (\text{eq. 2.3})$$

onde:

$S_{A,B}$... coeficiente de Seebeck de cada termoelemento ($\mu\text{V/K}$)

O uso de termopares é governado pela teoria citada anteriormente, a partir do qual pode ser estabelecidas as seguintes leis básicas /8/:

- . lei de metais homogêneos - se dois condutores homogêneos e iguais são utilizados para formar o circuito termoelétrico, a tensão termoelétrica resultante é igual a zero, isso resulta do fato de que o coeficiente de Seebeck dos condutores são iguais;
- . lei das temperaturas sucessivas - a força eletromotriz térmica de um termopar composto de materiais dissimilares homogêneos pode ser medida ou expressa como a soma das forças eletromotriz térmicas sobre os intervalos de temperaturas sucessivas (fig. 2.2). Essa lei permite que um termopar calibrado para uma dada temperatura de referência, possa ser usado em outra temperatura de referência, desde que corretamente corrigido. Também, como consequência, fios de extensão podem ser introduzidos no circuito do termopar sem afetar a f.e.m. térmica do termopar.

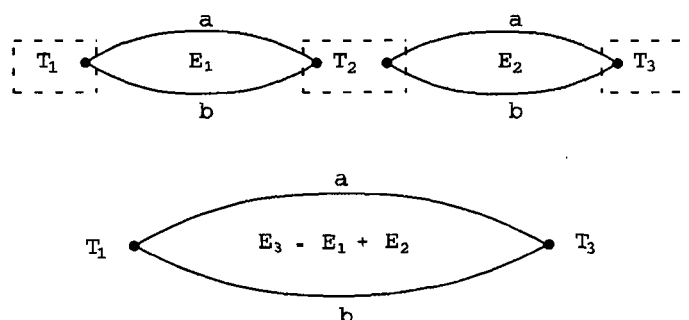


Figura 2.2. - Lei das temperaturas sucessivas.

. lei de metais intermediários - a soma algébrica das forças eletromotriz térmicas em um circuito composto por vários materiais dissimilares é zero se todo o circuito estiver a uma temperatura uniforme. A consequência dessa lei é que o 3º material homogêneo pode ser adicionado sem afetar a f.e.m. térmica do circuito, desde que as suas junções estejam na mesma temperatura (fig. 2.3a). Uma outra consequência, é que se as f.e.m. térmicas de quaisquer dois metais com respeito a um metal de referência (tal como C) são conhecidas, a f.e.m. térmica resultante da combinação dos 2 metais é a soma algébrica de suas f.e.m. térmica com relação ao metal de referência (fig. 2.3b);

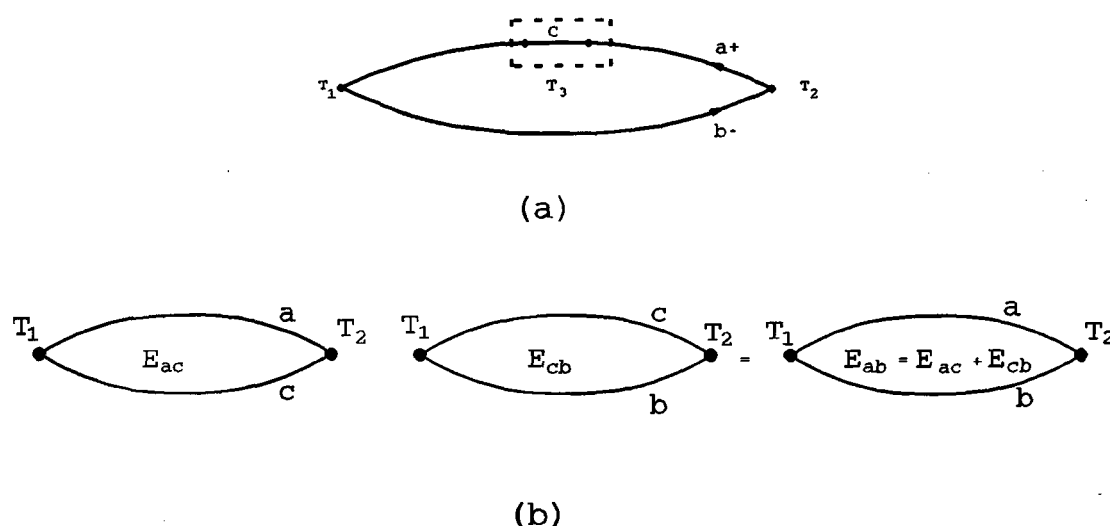


Figura 2.3. - Lei de metais intermediários.

b) Tipos de termopares (codificação internacional)

Tomando-se como base o princípio de Seebeck, qualquer combinação de dois metais ou ligas, semicondutores e não-metais podem formar termopares. A figura 2.4 apresenta os respectivos característicos de resposta dos termopares mais comumente utilizados /9/.

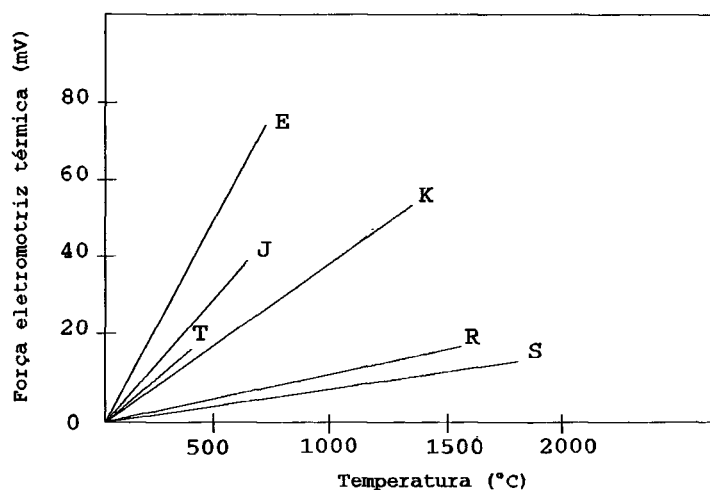


Figura 2.4 - Temperatura versus força eletromotriz térmica, junção de referência a 0 °C.

Apesar do amplo espectro de possibilidades, somente alguns metais/ligas são utilizados, devido a fatores que são considerados no processo de seleção dos materiais. São alguns deles:

- . a relação força eletromotriz térmica versus temperatura deve possuir boa linearidade e elevada sensibilidade;
- . ter aplicabilidade em ampla faixa de temperatura;
- . ser de fácil obtenção e reprodução;
- . ser resistente à oxidação e corrosão.

Os tipos mais comuns, classificados pelo " INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA - ISA ", estão listados abaixo, com indicação de suas respectivas letras de código e algumas características de aplicação /10 a 14/:

- . tipo J (Ferro/Constantan) - este tipo de termopar é recomendando para o uso em temperaturas entre 0 a 760 °C. Acima de 500 °C a taxa de oxidação do ferro é elevada, recomendando-se o uso de fios de maior bitola. À temperatura de 20 °C o coeficiente de Seebeck é de aproximadamente 51 $\mu\text{V/K}$;

- . tipo K (Cromel/Alumel) - nesse tipo de termopar o termoelemento positivo (KP), é uma liga composta, basicamente, por 89 a 90% Ni e 9 a 9,5% Cr, com adição de Si e Fe em quantidades aproximadamente de 0,5% e, em menor parcela, outros constituintes tais como C, Mn, Co e Nb. O termoelemento negativo (KN) é composto de \pm 95 a 96% Ni, 1 a 1,5% Si, 1 a 2,3% Al, 1,6 a 3,2% Mn, até \pm 0,5% Co e pequenas quantidades de outros constituintes tais como Fe, Cu e Pb. Os termopares tipo K são recomendados para uso contínuo em temperaturas entre - 250 a 1260 °C. Ambos termoelementos KP e KN estão sujeitos a oxidação quando usados em temperaturas acima de 850 °C, mas este tipo de termopar pode ser usado a temperaturas de até 1350 °C por curtos períodos. Quando ocorre a oxidação, há um gradual aumento na f.e.m. com o tempo. Deve-se ter cuidado com a corrosão e quando contaminado se torna frágil, esse processo é mais severo no alumel. O coeficiente de Seebeck à 20 °C é de aproximadamente 40 μ V/K;
- . Tipo T (Cobre/Constantan) - os termopares tipo T são resistentes a corrosão em atmosferas úmidas e são indicados para medir temperaturas abaixo de 0 °C, pois apresentam grande resistência à corrosão em atmosferas úmidas. Sua temperatura máxima de utilização é de aproximadamente 370 °C. O cobre oxida acima de 300 °C. É o único termopar com limites de erros estabelecidos em temperaturas abaixo de 0 °C. Uma desvantagem do termoelemento cobre é a sua alta condutividade térmica, em compensação pode ser produzido com alto grau de pureza, o que implica em ser aproximadamente uniforme e exibir pouca variação entre diferentes lotes de fabricação. Coeficiente de Seebeck à 20 °C é aproximadamente 40 μ V/K;
- . Tipo E (Cromel/Constantan) - os termopares tipo E são recomendados para uso na faixa de temperatura de - 250 °C a 870 °C. São convenientes para medição de temperaturas abaixo de 0 °C por não

estarem sujeitos à corrosão em atmosferas com alto conteúdo de umidade, em compensação ambos termoelementos possuem baixa condutividade térmica. O termopar tipo E possui o a maior coeficiente de Seebeck ($62 \mu\text{V/K}$ à 20°C) dentre todos os tipos de termopares e devido à essa característica são freqüentemente utilizados;

- . Tipo S e R (Platina/Platina+Ródio) - estes termopares são recomendados para uso contínuo entre -50 a 1400°C e intermitente até ao ponto de fusão da platina ($1767,6^\circ\text{C}$). Nunca devem ser inseridos diretamente em um tubo metálico pois os termoelementos são susceptíveis à contaminação. Ambos termoelementos são dúcteis e se tornam excessivamente macios e frágeis a 1700°C , apresentam moderada condutividade térmica e baixo coeficiente de Seebeck ($7 \mu\text{V/K}$ à 20°C);
- . Tipo B (Pt30%Rh/Pt6%Rh) - utilizado em temperaturas acima de 50°C , devido ao seu baixo coeficiente de Seebeck ($0.3 \mu\text{V/K}$ à 50°C). É recomendado para uso contínuo à temperatura de até 1750°C . Sob idênticas condições de aplicação o termopar tipo B tem um menor crescimento de grão (monocristal em um agregado policristalino) e é mais estável que os termopares tipo S ou R;
- . Tipo N (Nicrosil/Nisil) - o termopar tipo N é similar ao tipo K, mas tem a vantagem de minimizar algumas das instabilidades do par cromel-alumel. Tem uma maior porcentagem de silício no termoelemento cromel que melhora a resistência à oxidação em temperaturas elevadas. A faixa de temperatura varia de -270 a 1300°C . O coeficiente de Seebeck à 20°C é de aproximadamente $26 \mu\text{V/K}$.

A figura 2.5 lista os limites de erros tolerados para cada termopar de acordo com as normas ANSI E DIN /15/.

Norma ANSI	Faixa de Temp. (°C)	Limite de Erro	Norma DIN	Faixa de Temp (°C)	Limite de Erro
J	0 a 277 277 a 760	$\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.75\%$	Ferro-Constantan	0 a 400 acima de 400	$\pm 3\text{ K}$ $\pm 0.75\%$
K	0 a 277 277 a 1260	$\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.75\%$	NiCrNi	0 a 400 acima de 400	$\pm 3\text{ K}$ $\pm 0.75\%$
T	-101 a -59 -59 a 93 93 a 371	$\pm 2\%$ $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.75\%$	Cobre-Constantan	0 a 400 acima de 400	$\pm 3\text{ K}$ $\pm 0.75\%$
E	0 a 316 316 a 871	$\pm 1.7^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.5\%$	NiCr-Constantan	0 a 400 acima de 400	$\pm 3\text{ K}$ $\pm 0.75\%$
B	871 a 1705	$\pm 0.5\%$	PtPtRh 10% PtPtRh 13% PtRh 30/6%	0 a 600 acima de 600	$\pm 3\text{ K}$ $\pm 0.5\%$
S e R	0 a 538 538 a 1482	$\pm 1.4^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.75\%$			

Figura 2.5 - Termopares - Limites de erros permissíveis, norma ANSI e DIN.

Os tipos de atmosferas recomendáveis para cada termopar são apresentados na figura 2.6 /10/.

Termopar	Limitações Ambientais (junta exposta) -Tipo de Atmosfera ⁽¹⁾					
	Oxidante	Redutora	Inerte	Vácuo	Sulforosa	Vapores Metálicos
J	R	R (2)	R	R	não indicado p/T>500°C	R
K	R (3)	NI (2)	R	NI	NI	R
T	R	R	R	R	NI	R
E	R	NI	R	R	NI	R
R/S	R	NI	R	NI	NI	NI
B	R	NI	R	R-por curtos períodos	NI	NI

Figura 2.6. - Atmosferas recomendáveis para transdutores tipo termopar.

Nota: (1) R = recomendável e NI = não indicado;

(2) exemplos de tipos de atmosfera: oxidante: ar; inerte: argônio; redutor: hidrogênio, monóxido de carbono; vapores metálicos: zinco, chumbo;

(3) melhor do que o tipo E ou J para temperaturas acima de 550 °C, devido à sua resistência à oxidação.

c) Junção de referência

A força eletromotriz térmica gerada pelo termopar é função da diferença de temperatura de suas junções e do material dos termoelementos. Dois métodos básicos são usados mais comumente para obter a junção de referência (ou fria) /13,16/:

- . a junção de referência está a uma temperatura conhecida (banho de gelo, ponto triplo da água ou uma temperatura medida por meio de um outro sistema de medição);
- . é somada à força eletromotriz do termopar uma tensão proporcional a temperatura da junção de referência, provida por um circuito que incorpora um sensor de temperatura e uma fonte de tensão estabilizada.

O ponto triplo da água só é utilizado quando é necessário obter ± 0.0005 K de incerteza, com o banho de gelo obtém-se incertezas da ordem de aproximadamente ± 0.001 K /17/.

Dois tipos de compensação da junção de referência são mais utilizados na termometria automatizada, sendo denominados compensação por *software* ou *hardware*. Nesses tipos de compensação a temperatura do bloco isotérmico é medida por um circuito independente (termistor, termorresistor ou transdutor tipo circuito integrado) e sua temperatura é praticamente uniforme (± 0.05 K). A principal desvantagem, da compensação por *hardware*, é que quando utilizada para medição de temperatura em vários pontos, os termopares devem ser do mesmo tipo. Já na compensação por *software*, termopares de diferentes tipos podem ser utilizados e a compensação é feita através do *software* /9/.

O transdutor de temperatura tipo circuito integrado, é o mais comumente empregado em circuitos de compensação da junção de referência, no qual o sensor gera uma saída em forma de corrente ou

tensão linearmente proporcional à temperatura. Os valores típicos são $1 \mu\text{A/K}$ e 10 mV/K . Esse tipo de transdutor apresenta como características principais /18,19/:

- . faixa de temperatura limitada ($- 55$ a $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$), porém adequada para a quase totalidade das aplicações como circuito de compensação da junção de referência;
- . incerteza de medição típica de aproximadamente 1 K .

d) Fios e cabos de extensão/compensação

Na maioria das aplicações industriais de medição de temperatura, através de termopares, o transdutor não se encontra junto a unidade de tratamento de sinal. Logo, fios ou cabos de extensão/compensação são inseridos entre a junção de medição e de referência, e devem ter propriedades termoelétricas similares a dos fios do termopar utilizado.

* Chamam-se fios ou cabos de extensão aqueles fabricados com as mesmas ligas dos termopares a que se destinam (ex.: tipo TX, JX, EX, KX), e fios ou cabos de compensação aqueles fabricados com ligas diferentes daqueles que compõem o termopar, porém apresentando propriedades termoelétricas similares, e, dentro de uma faixa estabelecida de temperatura, transferindo efetivamente a junção de referência para a outra extremidade dos fios (ex.: SX, BX) /15/.

Devido à grande diversidade de aplicações, os fios e cabos de extensão e os de compensação são fornecidos com diversos tipos de isolamento interna e/ou externa, com a finalidade principal de protegê-los do ambiente a que estão expostos. Para facilitar a identificação

do tipo do termopar e polaridade dos termoelementos, convencionou-se fornecê-los em cores específicas (fig. 2.7).

Termopar tipo	Extensão ou compensação tipo	Materiais dos condutores		Coloração da isolação					
				Norma Americana ANSI MC-96.1 - 1975			Norma Alemã DIN 43710-4		
		Positivo	Negativo	Capa Ext.	Positivo	Negativo	Capa Ext.	Positivo	Negativo
T	Tx	Cobre	Constantan	Azul	Azul	Vermelha	Marrom	Vermelha	Marrom
J	Jx	ferro	Constantan	Preta	Branca	Vermelha	Azul	Vermelha	Azul
E	Ex	Chromel	Constantan	Roxa	Roxa	Vermelha			
K	Kx	Chromel	Alumel	Amarela	Amarela	Vermelha	Verde	Vermelha	Verde
S, R	Sx	Cobre	Cu/Ni	Verde	Preta	Vermelha	Branca	Vermelha	Branca

Figura 2.7. - Código de cores para fios e cabos de extensão/compensação.

Os limites de erros tolerados dos tipos mais comumente empregados são apresentados na figura 2.8 /15/

Termopar Tipo	Extensão Compensação Tipo	Faixa de utilização (°C)	Limite de Erro (K)	
			Padrão	Especial
K	KX	0 a 200	± 2.2	
J	JX	0 a 200	± 2.2	± 1.1
E	EX	0 a 200	± 1.7	
T	TX	-60 a 100	± 1.0	
S	SX	0 a 200	± 5.0	
R	RX	0 a 200	± 5.0	

Figura 2.8 - Fios e cabos de extensão/compensação. Limites de erros.

e) Aspectos construtivos

A figura 2.9 mostra uma construção típica de um termopar convencional.

O tubo de proteção tem por objetivo oferecer resistência contra choques mecânicos, térmicos, ou físico-químicos, que poderiam danificar o termopar. Também, podem ser utilizados poços termométricos para aplicações cuja pressão exceda a 300 kPa (3 bars), resultante do fluxo de líquido ou gases. A escolha do material do poço dependerá da agressividade do meio aonde o poço será utilizado /13/.

O cabeçote permite a conexão entre o termopar e os fios de extensão/compensação, deve possuir boa resistência a corrosão, poeira e umidade, além de ser de fácil fixação.

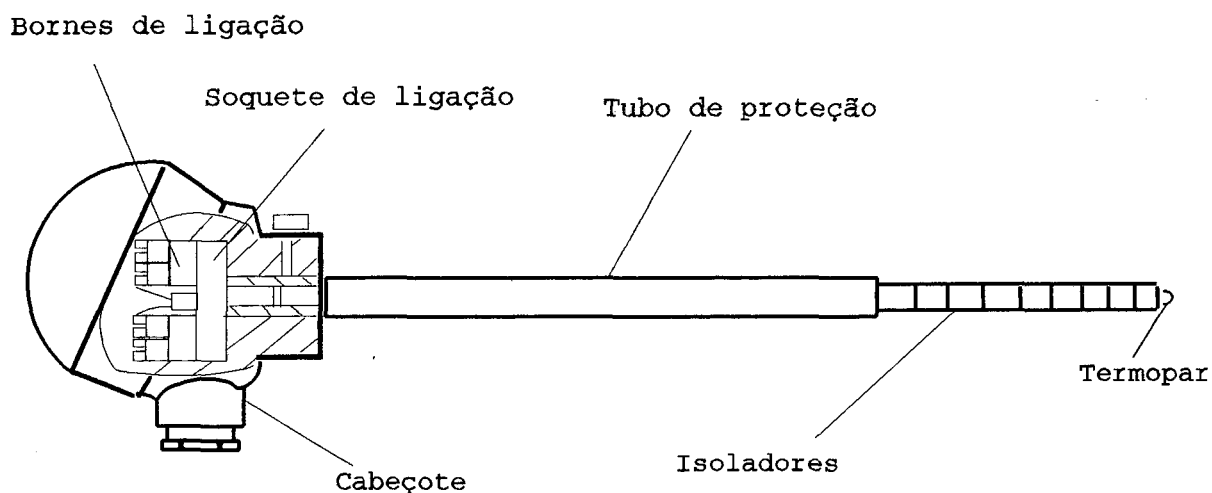


Figura 2.9. - Construção típica de um termopar convencional.

Um importante tipo de construção são os termopares de isolação mineral, onde os termoelementos são isolados com cerâmica compactada (geralmente MgO), protegidos por uma bainha metálica. É necessário adequar-se o material da bainha protetora com o meio no qual o termopar será utilizado.

Dentre as configurações da junção de medição, destacam-se as seguintes:

- . junta exposta - recomendada para medições onde é necessário rápido tempo de resposta, apresentam um erro mínimo de condução e radiação, são frágeis e susceptíveis à corrosão;
- . junta não aterrada - baixa velocidade de resposta, maior erro de condução e radiação do que a anterior, são recomendáveis onde campos elétricos tendem a afetar a f.e.m. térmica do termopar;
- . junta aterrada - para medições estáticas, escoamento de líquidos ou gases e para aplicações de alta pressão. Neste tipo de junta os condutores estão soldados juntos à bainha.

f) Conversão da f.e.m. térmica em temperatura

Uma alternativa para agilizar e obter a conversão direta de força eletromotriz térmica (f.e.m.t) para temperatura é a aplicação direta do polinômio /9/:

$$T = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (\text{eq. 2.4})$$

onde:

T ... temperatura

x ... f.e.m. térmica do termopar

$a_{0,n}$... constantes específicas de cada termopar

n ... ordem do polinômio

A figura 2.10 mostra um exemplo de polinômios usados em sistemas automáticos de aquisição de dados /9/.

	TIPO E	TIPO J	TIPO K	TIPO R	TIPO S	TIPO T
	-100 a 1000 °C ± 0.5 °C	0 a 760 °C ± 0.1 °C	0 a 1370 °C ± 0.7 °C	0 a 1000 °C ± 0.5 °C	0 a 1750 °C ± 1 °C	-160 a 400 °C ± 0.5 °C
a ₀	0.104967248	-0.048868252	0.226584602	0.263632917	0.927763167	0.100860910
a ₁	17189.45282	19873.14503	24152.10900	179075.491	169526.5150	25727.94369
a ₂	-282639.0850	-218614.5353	67233.4248	-48840341.37	-31568363.94	-767345.8295
a ₃	12695339.5	11569199.78	2210340.682	1.90002E +10	8990730663	78025595.81
a ₄	-448703084.6	-264917531.4	-860963914.9	-4.82704E +12	-1.65365E +12	-9247486589
a ₅	1.10866E +10	2018441314	4.83506E +10	7.62091E +14	1.88027E +14	6.97688E +11
a ₆	-1.76807E +11		-1.18452E +12	-7.20026E +16	-1.37241E +16	-2.66192E +13
a ₇	1.71842E +12		1.38690E +13	3.71496E +18	6.17501E +17	3.94078E +14
a ₈	-9.19278E +12		-6.33708E +13	-8.03104E +19	-1.56105E +19	
a ₉	2.06132E +13				1.69535E +20	

Figura 2.10 - Coeficientes do polinômio utilizado como característico de resposta de termopares (referente eq. 2.4).

2.1.2. Sensores Resistivos

Operam baseados no princípio da variação da resistência elétrica do material em função da temperatura. Dois diferentes tipos de transdutores são normalmente empregados: termorresistores (metálicos) e termistores (semicondutores).

a) Termorresistores

São confeccionados com fios de alta pureza de materiais tais como platina, cobre ou níquel (fig. 2.11), encapsulados em corpos tais como: cerâmicos, vítreos ou de fibra de vidro /17/. Também são disponíveis fios de tungstênio e molibidênio para temperaturas de até aproximadamente 1200 °C /20,21/.

Apresenta como características gerais: estabilidade, linearidade, alto custo, auto-aquecimento e a necessidade de excitação externa /22/.

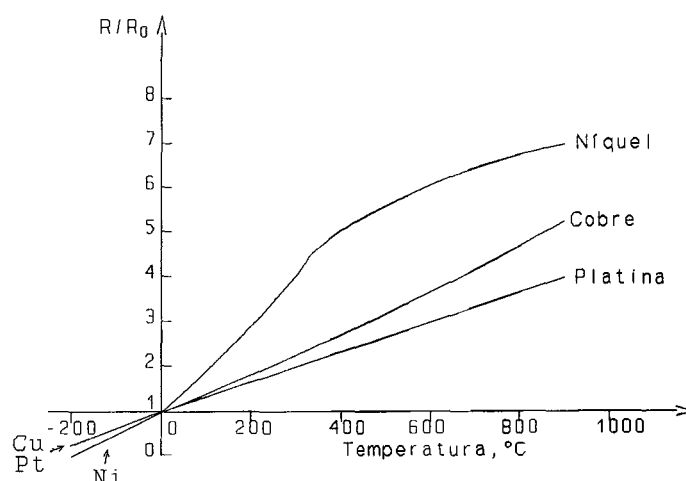


Figura 2.11 - Temperatura versus variação relativa da resistência (R/R_0) dos termorresistores de Ni, Cu e Pt.

O elemento sensor do termorresistor pode ser de diferentes tamanhos e formas, sendo a mais comum tipo bobina (convencional) ou tipo filme (mais utilizado com fio de platina) /23/. A principal vantagem do tipo filme é a redução do tamanho, implicando um tempo de resposta da ordem 0,1 s, comparado com termopares de pequenas dimensões. Tubos de proteção de aço inoxidável, vidro e cerâmica são geralmente usados para proteger de atmosferas corrosivas, umidade e do meio no qual é inserido o transdutor /16/.

O termorresistor de níquel, quando usado, é normalmente devido à sua sensibilidade (aproximadamente duas vezes a sensibilidade do termorresistor de platina) e seu baixo custo; contudo, é menos linear e sua estabilidade é mais pobre que a do termorresistor de platina. Sua faixa de operação varia de aproximadamente de - 60 a 180 °C. O termorresistor de cobre tem boa linearidade e sensibilidade menor que a do níquel. Sua faixa de operação varia de - 70 a 100 °C e é freqüentemente utilizado em indústria de material elétrico (ex.:

medição de temperatura do enrolamento de dinamos, motores e transformadores) /24/.

A platina é o metal mais utilizado devido a sua alta estabilidade sobre uma ampla faixa de temperatura ($<0,1$ K quando o sensor é usado em sua temperatura limite superior); a sua ampla faixa de operação (-200 a 962 °C); reprodutibilidade, e de ser relativamente imune à corrosão. Além disso, o termorresistor de platina é o instrumento interpolador padrão da Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90), do ponto triplo de equilíbrio do hidrogênio ($-259,3467$ °C) ao ponto de solidificação da prata ($961,78$ °C) /24,25/.

A estabilidade dos termorresistores de platina depende da estrutura cristalina e das tensões do fio, em qualquer faixa de temperatura. Esses fatores tornam-se mais importante à medida que a temperatura aumenta ($T > 400$ °C) /26 a 30/. A figura 2.12 mostra uma construção típica de um termorresistor industrial de platina /31,32/.

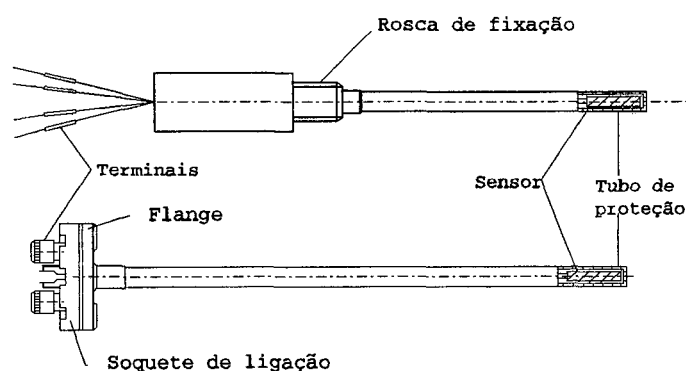


Figura 2.12 - Termorresistor de platina industrial.

A relação resistência x temperatura para a maioria dos materiais metálicos pode ser expressa matematicamente através da equação 2.5 /17/:

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2 + \dots + Nt^n) \quad (\text{eq. 2.5})$$

onde:

R_0 ... resistência em $T = 0^\circ\text{C}$

A, B, N ... constantes características do material do sensor

A relação resistência x temperatura usada para o termorresistor padrão industrial de platina é /31,32/:

. de -200 a 0°C :

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100^\circ\text{C}) t^3] \quad (\text{eq. 2.6})$$

. de 0 a 850°C :

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad \text{---(eq. 2.7)}$$

onde:

A ... $3.908\ 02 \times 10^{-3}^\circ\text{C}^{-1}$

B ... $-5.802 \times 10^{-7}^\circ\text{C}^{-2}$

C ... $-4.273\ 50 \times 10^{-12}^\circ\text{C}^{-4}$

A constante A, também denominada alfa, é o coeficiente de variação de resistência com a temperatura, e devido a diferentes projetos e técnicas de fabricação, varia de $0.00392^\circ\text{C}^{-1}$ (termômetros de resistência a platina padrão - SPRT) para $0.00385^\circ\text{C}^{-1}$ (termorresistores industriais), e é definida por /31,32/:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \times R_0} \quad (\text{eq. 2.8})$$

onde:

R_{100} ... resistência a 100 °C

R_0 ... resistência a 0 °C

A figura 2.13 apresenta os limites de erros tolerados em função da temperatura para termorresistores de platina, $R(0^\circ\text{C}) = 100\ \Omega$, e níquel, segundo a norma DIN 43760 /33/.

T	Limite de Erros Tolerados (°C)		
	Termorresistor de Ni	Termorresistor de Pt	
		Classe A	Classe B
-200		± 0.55	± 1.3
-100		± 0.35	± 0.8
-60	± 2.1		
0	± 0.4	± 0.15	± 0.3
100	± 1.1	± 0.35	± 0.8
180	± 1.7		
200		± 0.55	± 1.3
300		± 0.75	± 1.8
400		± 0.95	± 2.3
500		± 1.15	± 2.8
600		± 1.35	± 3.3
650		± 1.45	± 3.6
700			± 3.8
800			± 4.3
850			± 4.6

Figura 2.13 - Limites de erros para termorresistores de platina e níquel.

b) Termistores

Ao contrário dos termorresistores, os termistores apresentam grande variação da resistência com a temperatura (fig. 2.14) /34/. São disponíveis com coeficiente de temperatura positivo e negativo. Sua resistência a 25 °C pode variar de 500 Ω a megaohms, são não lineares e necessitam de excitação externa (tensão ou corrente). Incertezas de medição de $\pm 0,1$ a $\pm 0,01$ K podem ser obtidas, requerendo para tanto, especial cuidado na fabricação.

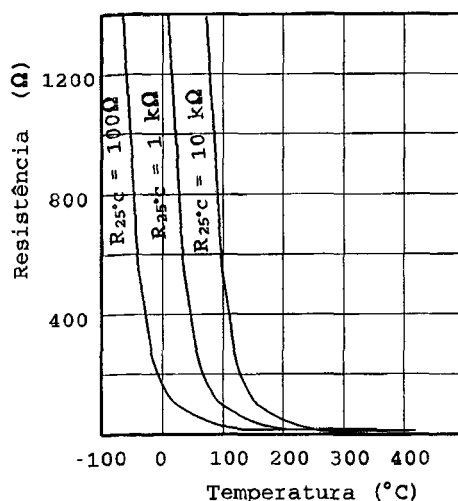


Figura 2.14 - Exemplo do característico de resposta de diferentes termistores do tipo coeficiente negativo de temperatura.

Os termistores de óxidos de metais (coeficiente de temperatura negativo-NTC) são os mais comumente utilizados na termometria. São compostos por uma mistura de óxido de níquel, manganês com pequenas adições de outros metais, e sinterizados a uma temperatura acima de aproximadamente 1000 °C.

São utilizados principalmente na faixa de temperatura de - 70 a 130 °C. Contudo, há tipos para temperaturas acima de 400 °C e menores que 3 K /17,35 /. Apresentam excelente estabilidade (0,5 mK/ano) quando hermeticamente selados e quando não são expostos por longos períodos a temperaturas elevadas /36/. A estabilidade depende fortemente da temperatura de aplicação e do processo de fabricação /33,36/.

Há uma variedade de tamanhos e tipos disponíveis comercialmente tais como: bolha, disco e arruela (com ou sem encapsulamento). São pequenos (chegando a ser de aproximadamente 0,1 mm de diâmetro),

implicando rápido tempo de resposta (da ordem de milisegundos) e menor massa térmica, comparados com o termorresistor tipo convencional /34,37/.

Pela equação de Steinhart-Hart, a mais comumente utilizada, o característico de resposta do termistor pode ser dado como /38/:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C \ln(R)^3 \quad (\text{eq. 2.9})$$

onde:

T ... temperatura

R ... resistência do termistor

A,B,C ... constantes características do material semicondutor

As constantes A,B,C são encontradas pela seleção de 3 pontos (R₁,T₁; R₂,T₂; R₃,T₃) resolvendo simultaneamente a equação das 3 incógnitas. Quando - 40 °C ≤ T₁, T₂, T₃ ≤ 150 °C, | T₂ - T₁ | ≤ 50 °C e | T₃ - T₂ | ≤ 50 °C, os erros gerados pela interpolação são de aproximadamente ± 0,01 K /16/.

Existem outros modelos empíricos e semi-empíricos que fornecem resultados melhores, com incertezas da ordem de milikelvin, mas possuem maior complexidade no que se refere à fórmula e obtenção dos parâmetros /39/.

A principal razão do freqüente uso dos termistores é devido ao seu baixo custo, pequenas dimensões e seu coeficiente de temperatura α (de aproximadamente - 2% à - 6%/K) que é muito maior se comparado com o termorresistor de platina. Devido à alta sensibilidade são mais convenientes para medição de pequenas faixas de temperaturas /37/.

Comportamento mais linear dos termistores pode ser obtido por meio de circuitos, como por exemplo: ponte linear ou rede de termistores linear (fig.2.15) /40/.

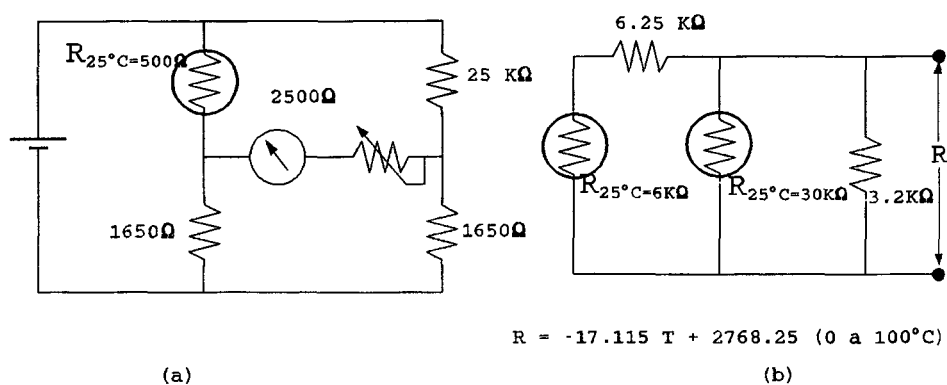


Figura 2.15. - Circuitos para linearização de termistores. (a) circuito de ponte. (b) rede de termistores lineares.

São disponíveis comercialmente sensores contendo 2 ou 3 termistores, com erros de não linearidade que podem ser menores que 0,1 K entre - 50 a 50 °C. Quanto mais estreita for a faixa de temperatura, menor é o erro de não linearidade (fig. 2.16) /33/.

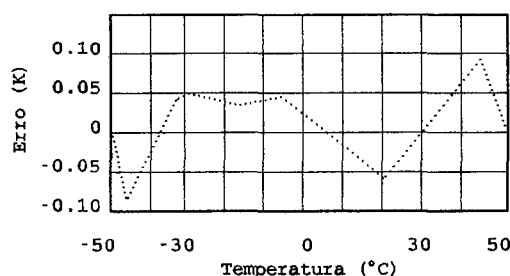


Figura 2.16. - Exemplo típico do erro devido à não linearidade de transdutores tipo termistor.

A limitada intercambialidade devido à não uniformidade entre os diversos tipos de termistores e o auto-aquecimento decorrente da necessidade de alimentação elétrica, são as principais desvantagens que apresentam.

2.2. CIRCUITOS USUAIS NA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA COM TRANSDUTORES ELÉTRICOS

Diferentes circuitos são utilizados na termometria com transdutores elétricos. Para sensores resistivos os circuitos típicos são circuitos de ponte e ohmímetro, e voltímetros e potenciômetros para termopares. Os voltímetros e multímetros digitais são os mais utilizados principalmente em aplicações industriais. Isto devido à sua alta impedância de entrada, pequeno tamanho, indicação digital, facilidade de interfaceamento a computadores, implicando maior velocidade para aquisição de dados e análise /17/.

2.2.1. Medição de Pequenas Tensões

Os instrumentos de medição da força eletromotriz gerada por um termopar são aqueles adequados à medição de baixos níveis de tensão; dos quais os mais utilizados são: voltímetros e potenciômetros. O voltímetro, em especial os digitais, devido a sua grande variedade de modelos, resoluções da ordem de nanovolts, diversidade de fabricantes e facilidade de interfaceamento com computador tem sido mais utilizado tanto na indústria como em laboratórios.

O voltímetro real pode ser representado por uma impedância infinita de entrada em paralelo como o circuito elétrico equivalente Thévenin do transdutor ou qualquer outra fonte (fig. 2.17).

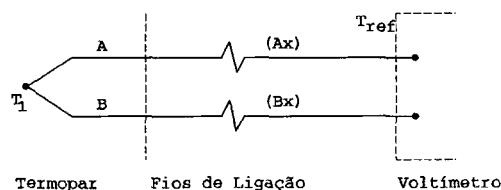


Figura 2.17 - Circuito elétrico simples utilizando um voltímetro.

Pelo fato de que na maioria das vezes a temperatura é uma grandeza que pode ser considerada quase-estática, as reatâncias envolvidas contribuem de forma pouco significativa, podendo-se assumir que a impedância é puramente resistiva, simplificando sobremaneira o circuito elétrico equivalente.

Vários termopares podem ser conectados em série ou em paralelo para obter funções específicas. A associação em série de termopares (termopilha) é usada principalmente para medir pequenas diferenças de temperatura, pois aumenta a sensibilidade (fig.2.18).

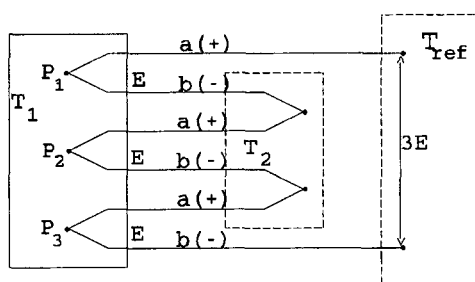


Figura 2.18 - Associação em série de termopares.

A associação em paralelo (fig. 2.19) fornece o valor médio das temperaturas dos pontos de aplicação, tais como em medição de temperatura.

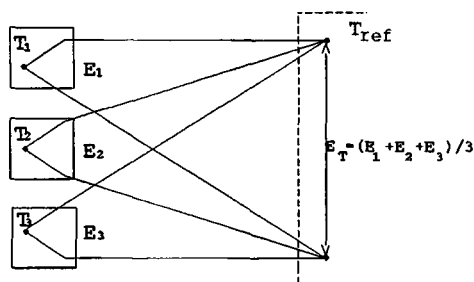


Figura 2.19 - Associação em paralelo de termopares.

No termopar diferencial, a tensão termoelétrica gerada é proporcional à diferença das temperaturas (fig. 2.20) /14/. Do ponto de vista elétrico, o circuito resultante é exatamente igual àquele que se tem na medição com termopar mais a junção de referência.

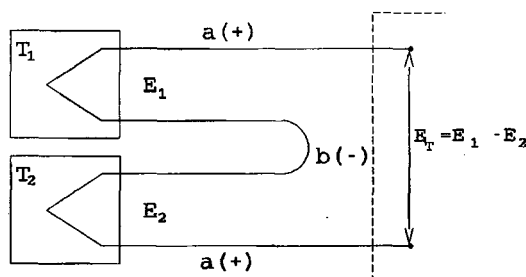


Figura 2.20 - Termopar diferencial.

Para aplicações onde a temperatura varia rapidamente (ex.: medição de temperatura de superfície), o circuito apresentado na figura 2.21 é o mais indicado.

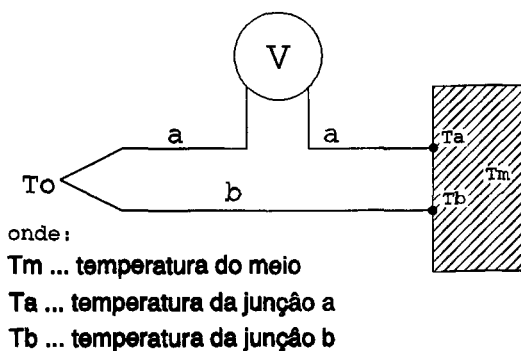


Figura 2.21. - Termopar intrínseco.

Neste tipo de circuito, cada termoelemento é fixado separadamente na superfície do meio sob medição a fim de melhorar a resposta dinâmica do termopar /41/.

2.2.2. Medição de Resistência

Os circuitos de ponte são os circuitos mais clássicos utilizados na medição de resistência, enquanto que o ohmímetro é o mais empregado em sistemas de aquisição de dados. Os sensores resistivos são disponíveis em três configurações típicas: dois, três e quatro fios (fig. 2.22).

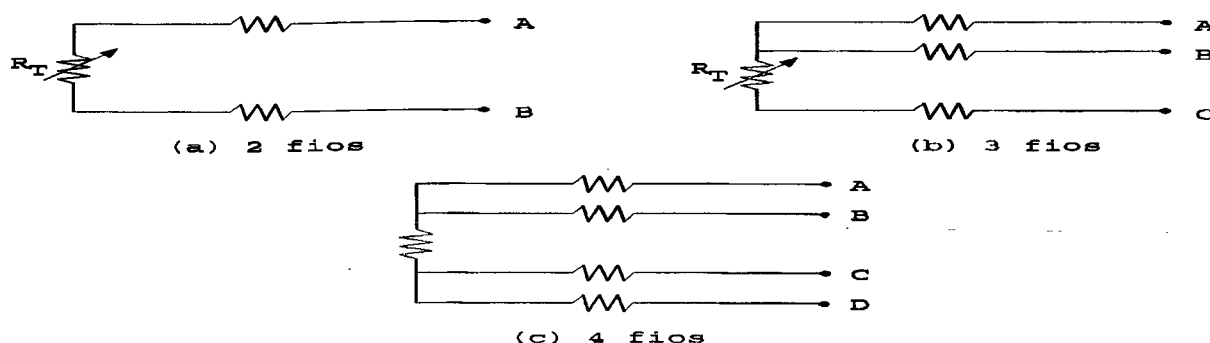


Figura 2.22 - Configurações típicas utilizadas com sensores resistivos.

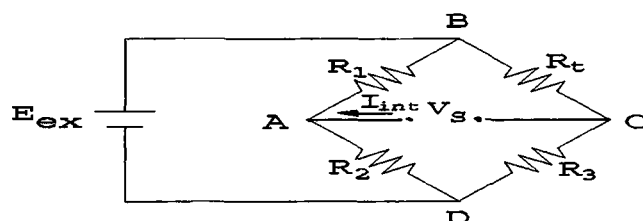
A ligação a dois fios é a configuração mais simples, sendo somente especificada em aplicações onde resistências parasitas tais como: contato de chaves seletoras, fios de ligação e suas variações com a temperatura; são pequenas em comparação com a resistência do transdutor ou quando a unidade de condicionamento de sinal fornece um método de compensação.

Na ligação a três fios, os fios têm o mesmo comprimento e são de materiais iguais, portanto, exibem a mesma variação de

resistência. Desta forma, pode-se conseguir a compensação das resistências dos fios pela ligação em ponte de Wheatstone e medição direta com o ohmímetro. A ligação a 4 fios é a configuração mais cara, principalmente em longas distâncias, mas é mais conveniente para aplicações onde é necessário menor incerteza de medição.

a) Circuitos de ponte

Ponte de Wheatstone é o circuito tipo ponte de resistências mais comumente utilizado (fig. 2.23) /17/.



$$\text{Para } I_{int} = 0 \\ V_s = \left(\frac{R_t}{R_t + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) E_{ex} \Rightarrow \Delta V_s = E_{ex} \left(\frac{R_t \cdot \Delta R_t}{R_t + \Delta R_t + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

Figura 2.23 - Ponte de Wheatstone com alimentação c.c.

O princípio básico da ponte pode ser do tipo deflexão direta ou balanceamento nulo. Excitação por corrente ou por tensão (c.c. ou c.a) pode ser usada, sendo que, a excitação por corrente, na prática, fornece uma saída mais linear (eq. 2.10), sendo que a diferença para alimentação em tensão é sentida quando se tem grandes variações de resistência (medição de temperatura em uma ampla faixa com termorresistores e, em especial com termistores) /42/.

$$V_s = \frac{I}{R_1 + R_2 + R_3 + R_t} (R_t R_2 - R_3 R_1) \quad (\text{eq. 2.10})$$

No método de deflexão direta, as resistências são ajustadas até que a ponte esteja balanceada, isto é, que $V_{AC} = 0$ ($R_1/R_2 = R_3/R_t$). O desbalanceamento da ponte ocorre à medida que R_t varia. Rápida resposta dinâmica pode ser obtida, mas é necessário que o restante do sistema de medição esteja ajustado para a particular medição. E se a excitação da ponte (E_{ex}) variar, um erro proporcional à variação relativa da excitação é introduzido /17/.

No tipo balanceamento nulo, se R_t varia a resistência de um dos resistores no outro braço da ponte é ajustada até atingir o equilíbrio. Neste método, é necessário um resistor variável calibrado /43/. É característica dos instrumentos que operam por este método a baixa incerteza de medição, mas o tempo de resposta é maior e igualmente são maiores as dificuldades de automação.

Circuitos de ponte são ideais para medição de temperatura média ou diferencial, isto é, leituras entre transdutores diferentes (fig. 2.24) /17/.

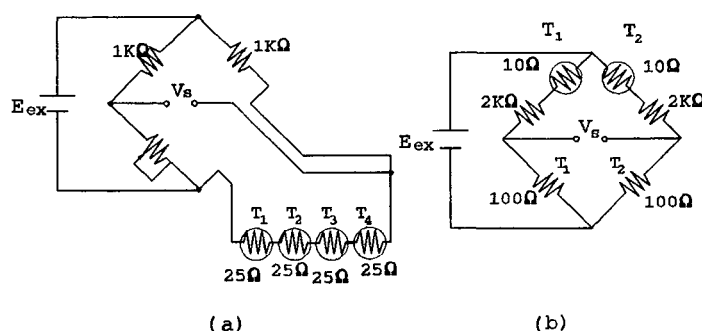


Figura 2.24. - Circuito utilizado para medição de temperatura média e diferencial com termorresistores.

A ponte Mueller é uma variação da ponte de Wheatstone e é freqüentemente usada em laboratórios de calibração (fig. 2.25). Nesse

circuito, com as chaves nas posições mostradas, a corrente total da ponte fluirá por Rf1 e se dividirá na junção Rf1 e Rf2. Desse modo, Rf2 passa a ocupar o braço superior esquerdo da ponte e a resistência do termômetro (R_t) mais Rf4 fazem parte do braço superior direito da ponte. Alterando as posições das chaves, Rf4 e Rf2 trocarão de posições e o sentido da corrente será invertido. Duas leituras são feitas, uma com a chave na posição mostrada e outra na posição alternada. Desta maneira, variações na resistência dos fios e tensões de offsets podem ser compensadas /34/.

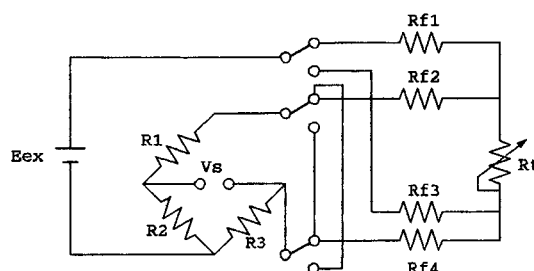


Figura 2.25. - Ponte Muller.

Circuitos de ponte permitem detectar variações menores que $\pm 0,005$ K, para medição de pequenas faixas de temperaturas, aumentando proporcionalmente com o aumento da faixa devido ao problema da não linearidade /44/.

b) Ohmímetro

O ohmímetro é a técnica mais amplamente empregada em termômetros digitais e sistemas de aquisição de sinais (fig. 2.26). Opera na base da lei de Ohm, utilizando uma fonte de corrente e um voltímetro.

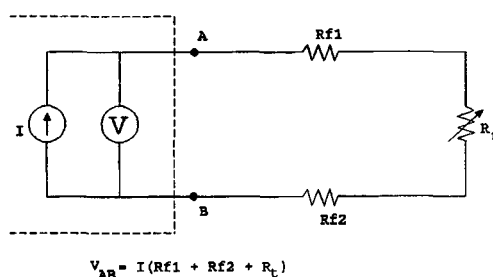


Figura 2.26 - Ohmímetro - Configuração a 2 fios.

Observa-se que no caso de medição a 2 fios a resistência medida é a equivalente do circuito formado pelas resistências dos fios de ligação, transdutor e qualquer outra resistência em série ao circuito de medição.

Na medição a 4 fios, a tensão lida é resultado do produto de uma corrente constante pelo valor da resistência que se quer medida. O efeito das resistências dos fios ou qualquer outras resistências, resultante de correntes parasitas presentes no circuito de medição, são normalmente menores que na medição a 2 fios, mas deve ser considerado dependendo da faixa de temperatura.

2.3. AUTOMAÇÃO DA AQUISIÇÃO DE SINAIS

Em termos de instrumentação para medição automatizada de temperatura observa-se na prática duas situações: a utilização de sistemas especializados de aplicação dirigida; e, a crescente utilização de sistemas encadeados a partir de módulos de processamento, interfaceamento e de acessórios oferecidos por diferentes fabricantes. A segunda, se firma como a melhor alternativa em decorrência da tendência ascendente de adoção de barramentos

padronizados, permitindo a mesclagem de módulos de diferentes fabricantes.

A figura 2.27 apresenta um diagrama esquemático de uma usual configuração de um sistema de medição com multiplexação de transdutores, para medições de múltiplos pontos /45/.

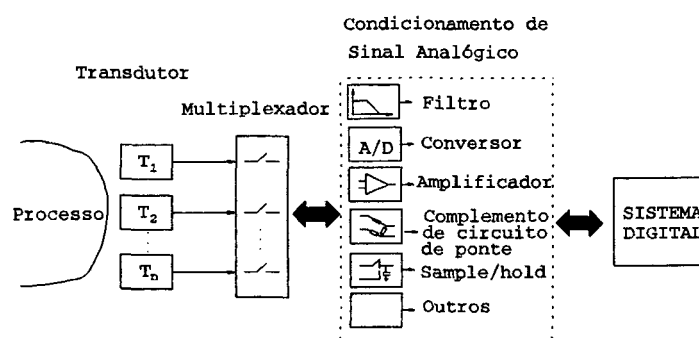


Figura 2.27 - Diagrama esquemático do sistema de medição.

2.3.1. Chaveamento

As chaves mais utilizadas em instrumentação de medição são dos tipos relé (eletromecânica e eletromagnética) e semicondutora. Estas são usadas para conectar os transdutores ao circuito de processamento analógico dos sinais /46 a 48/.

Multiplexadores são usados para chavear múltiplos canais para um único instrumento de medição, de uma vez. São disponíveis de vários tipos: um fio, dois fios (diferencial), três fios (*high*, *low* e *guarded*), quatro fios (para sensores resistivos). Têm como elementos básicos constituidores as chaves. Independentemente do tipo de chave o circuito de multiplexação pode ser modelado eletricamente conforme mostra a figura 2.28 /52/.

diferencial da chave (V_t), resistências combinadas (R_{dif}) e de contato fechado da chave (R_c).

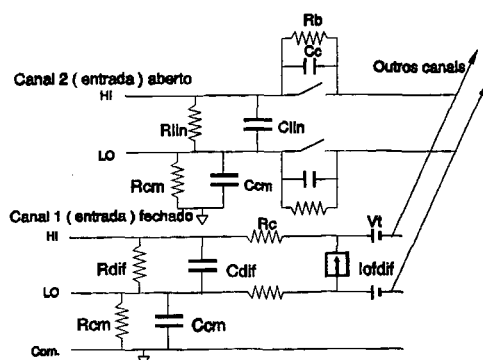


Figura 2.28. - Modelo elétrico do circuito de multiplexação, 2 canais-2 pólos.

Do levantamento de chaves como componentes individuais e de módulos de multiplexação de sistemas atualmente oferecidos por alguns fabricantes /44,48,49,50,51/, podemos resumir suas principais características (valores típicos), conforme é apresentado na figura 2.29.

Caract.	Chave semicondutora	Multiplexador semicondutor	Chave relé	Multiplexador relé
R_c	40 a 1 k Ω	40 a 3 k Ω	<1 Ω	2 a 150 Ω
V_t		5 a 15 μV (0 a 28 °C) 220 μV (>28 °C)	100 μV	1 a 50 μV
I_{of}	50pA a 1nA	50 pA a 65 nA (0 a 28 °C) 800 nA(28 a 55 °C)	50 pA	50 pA a 1 nA
R_I		10^7 a $10^9 \Omega$		10^6 a $10^9 \Omega$

Figura 2.29. - Principais características de chaves, tipo semicondutora e relé, e de placas multiplexadoras implementadas a partir destas.

2.3.2. Condicionamento de Sinais

Os circuitos de condicionamento de sinal oferecem conexão com o transdutor, complementos para medição em ponte, 2, 3 ou 4 fios, linearização, amplificação, alimentação, compensação de junta fria, isolamento, filtragem e outros /44,52/. Dentre os circuitos de condicionamento de sinal citam-se:

- . filtragem - circuitos elétricos usados para reduzir sinais indesejáveis tais como : ruídos, interferência de estações de rádio/TV e sinais com frequência acima $1/2$ da frequência de amostragem, os quais poderiam levar a erros de *aliasing* /17/;
- . amplificador - amplifica o nível do sinal analógico. O mais utilizado em sistemas de medição é o amplificador de instrumentação que apresenta um circuito simétrico de impedância alta em ambos os terminais, inversor e não-inversor, como também, alta rejeição de modo comum. Amplificadores com características especiais como os *choppers*, são empregados para atenuar erros decorrentes de laços de terra, interferências da rede c.a. e ruídos /53/. Em situações onde a isolamento elétrica por questão de segurança de equipamentos ou usuários se faça necessário, são recomendados os amplificadores de isolamento /44/;
- . *Sample/Hold* - é uma memória analógica, cuja função é captar e armazenar o sinal antes do começo de uma conversão e mantê-lo constante até o final da conversão. São usualmente utilizados com conversores A/D de aproximação sucessiva /44/;
- . conversor de tensão-corrente - usado para converter pequenas tensões em corrente entre 4 a 20 mA, normalmente para transmitir o sinal a grandes distâncias ou em ambientes em que interferências eletromagnéticas poderiam comprometer a transmissão em tensão /52/.

. conversor A/D - usado para converter sinais analógicos em digitais. Para aplicações na metrologia em baixas frequências, o n° de *bits* é a principal característica de um conversor, é o que define a sua resolução. Conversores de 8 a 12 *bits* são os mais comumente empregados, já que sua resolução se situa entre 0,4 a 0,024 % da faixa de operação, o que é adequado para medição de temperatura e de grande parte das demais medições em engenharia. O tipo a ser selecionado depende da incerteza de medição (que está relacionada com a estabilidade da tensão de referência e dos valores dos resistores), velocidade de conversão, imunidade ao ruído e custo. Muitos módulos conversores disponíveis no mercado não incluem somente o conversor, mas também circuitos multiplexadores, *sample/hold* e interfaces de comunicação para microprocessadores. Os tipos mais comuns são aproximação sucessiva, integração e paralelo (*flash*) /54,55/:

a) conversores paralelos comparam o sinal de tensão de entrada com um valor de referência de tensão. São os mais rápidos, permitindo uma taxa de amostragem de nanosegundos (da ordem de 10^8 ou 10^9 conversões por segundo). A necessidade de comparadores atuando simultaneamente os tornam limitados em termos práticos e sua resolução é equivalente a 8 *bits* ou menor. São utilizados para alta velocidade de processamento de vídeo, tais como em radar e osciloscópio digital, não justificando sua utilização para medições físicas, em especial de temperatura;

b) conversões tipo aproximação sucessiva comparam seqüencialmente uma série de valores com a entrada analógica para produzir uma saída digital. Por causa de sua alta resolução (16 *bits*) e velocidade (1 ou 2 μ s), são largamente utilizados, especialmente no interfaceamento com computadores. A técnica de conversão consiste da comparação do sinal de entrada, com uma tensão ou corrente de

referência, gerada por um conversor D/A. O processo é análogo ao pesar em uma balança de comparação uma determinada massa usando o passo binário como padrão. A incerteza, linearidade e velocidade são determinadas primeiramente pelas propriedades do conversor D/A e do comparador. A linearidade é determinada pelo conversor D/A. É essencial que o sinal de entrada seja mantido constante durante a conversão, sendo conveniente utilizá-lo precedido de um circuito *sample/hold*;

c) o tipo integrador exige geralmente milisegundos para a conversão, possui alta resolução (8 a 12 *bits*), filtragem de ruídos e custo moderado. Integra o sinal de entrada sobre um intervalo de tempo, minimizando o ruído nesse intervalo. A velocidade que é um dos principais fatores que limitam a sua utilização em muitas aplicações, não é crítica no caso de medição de temperatura. São usualmente utilizados em aquisição de dados. O tempo de conversão aumenta com a resolução. O modelo mais utilizado é o dupla rampa. A linearidade e a incerteza de medição são geralmente melhores do que qualquer outro conversor, pois não há possibilidades de oscilações (*glitches*) nem perdas de código.

Cada dia é mais freqüente o uso de sistemas automatizados para a medição de temperatura, sendo inquestionáveis as suas vantagens, inclusive, em muitos casos, de possibilidades de redução de incertezas de medição. Porém, além de dificuldades adicionais no cálculo das incertezas, a introdução dos módulos necessários à automação, poderá, também, significar elevação considerável da incerteza.

A análise das várias fontes de erros inerentes é, portanto, imprescindível para que se realize medições com qualidade assegurada.

É necessário, portanto, para cada processo de medição analisar sistematicamente cada fonte de erro e, em conjunto com as características estáticas e dinâmicas dos instrumentos, estabelecer o seu grau de significância.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM DA CADEIA DE MEDIÇÃO NA TERMOMETRIA COM AQUISIÇÃO AUTOMATIZADA

A qualidade do resultado de uma medição é avaliada pela sua incerteza. Os erros envolvidos dependem dos inúmeros elementos que compõem o processo de medição, o qual é caracterizado pelos instrumentos, procedimentos de medição e condições de contorno particulares. Expressar um resultado confiável implica levar em consideração o processo de medição como um todo, sob pena de se chegar a resultados totalmente enganosos.

Neste capítulo são analisadas as fontes de erros na termometria automatizada com transdutores elétricos, com o objetivo de se chegar a um modelo elétrico aplicável à quantificação das incertezas de medição decorrentes. É feita uma análise sistematizada das fontes de erros comuns aos sistemas de medições elétricos e das específicas da automação. Ilustrando problemas adicionais, são também apresentadas fontes de erros inerentes aos transdutores e específicas da aplicação.

A partir do modelo elétrico dos elementos constituidores dos sistemas de medição, são apresentados resultados oriundos da

simulação da aplicação de instrumentos com características semelhantes aos disponíveis no mercado atualmente.

3.1. SISTEMAS DE MEDIÇÃO ELÉTRICOS

Com a crescente tendência à padronização entre fabricantes de módulos de sistemas de aquisição de sinais vai se tornando cada vez mais interessante, técnica e economicamente, a opção por um sistema genérico encadeado a partir de produtos modulares de diferentes fabricantes, fazendo com que a incerteza do processo de medição deva ser calculada a partir das características específicas de cada módulo. Observa-se que poucos são os estudos que tratam dos problemas inerentes e que os fabricantes de instrumentos não têm fornecido as especificações necessárias para a composição das incertezas na medição de temperatura automatizada.

Considerando os erros e as incertezas associadas aos sistemas de medição elétricos na medição automatizada de temperatura, para efeito de análise, as principais fontes de erros podem ser divididas em dois grupos:

- . comuns aos sistemas de medição elétricos;
- . específicas da automação.

3.1.1. Fontes de Erros Comuns aos Sistemas de Medição Elétricos

Além do comportamento dinâmico, característica de qualquer sistema de medição, as fontes de erros mais significativas comuns aos sistemas de medição de temperatura elétricos, são:

- . instabilidades do característico de resposta;
- . retroação nas interligações de instrumentos;

- . forças eletromotrizes térmicas parasitas;
- . *offsets* e *drifts*;
- . ruídos;
- . tensões de modo comum;
- . interferências de campos magnéticos e elétricos.

Do levantamento de placas de interfaceamento para sistemas de aquisição de sinais de alguns dos atuais maiores fabricantes, resulta a figura 3.1, que resume algumas das principais características (valores típicos) /44,50,56,57,58/.

Características	Valor típico (a 25°C)
tensão de offset	5 μ V a 1mV
*drift de offset x temperatura	1 μ V/K a 1mV/K
*drift de offset x tempo	1 μ V/mês a 5 μ V/mês
*drift de offset x tensão de alimentação	3 a 6 μ V/V
corrente de offset	350pA a 5mA
*drift da corrente x temp.	2pA/K a 10pA/K
drift do ganho	20ppm/K a 50ppm/K
resistência de entrada	5M Ω a 10G Ω
RRMC	80dB a 150dB
ruído rms (0.1 a 10Hz)	0.1 μ V a 100 μ V

Figura 3.1 - Principais características da unidade de condicionamento de sinal.

Nota: (1) Cada parâmetro apresentado é constituído por um valor de base e uma faixa de dispersão função de tolerâncias de especificação, incertezas de medição, variações nas condições de contorno e de fatores aleatórios.

a) Instabilidades do característico de resposta

As características metrológicas dos sistemas de medição, em geral, sofrem alterações, sejam em função do tempo ou mesmo de outras grandezas de influência (ex.: temperatura, umidade, vibrações, choques) e podem ser de carácter permanente, de curta ou de média

duração /59/.

A instabilidade de tais características dos sistemas de medição é um dos principais fatores que afetam a incerteza de medição e a sua influência é função do tipo de sistema de medição.

b) Retroação nas interligações dos instrumentos

A retroação (relação de impedâncias) nas interligações dos instrumentos, pode tornar-se crítica, principalmente, para circuitos fontes com alta resistência (ex.: termistor ou multiplexador semicondutor), em especial, quando a resistência de entrada da unidade de condicionamento do sinal é da ordem de megaohms ou menor /58/. Uma das maneiras de analisar este efeito é a aplicação do teorema de Thévenin (fig. 3.2).

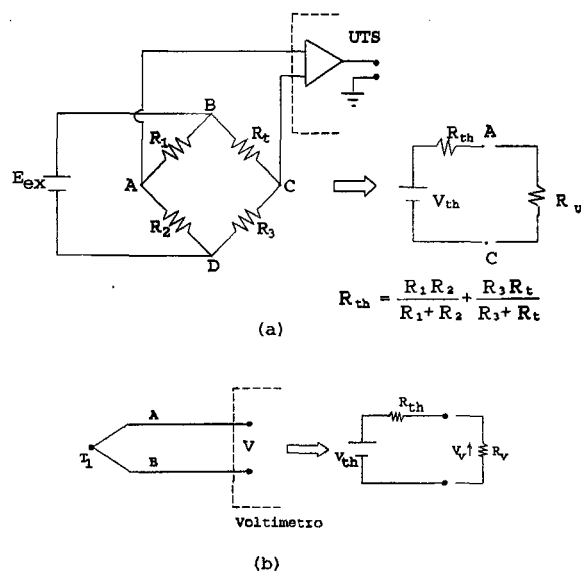


Figura 3.2. - Modelo elétrico equivalente Thévenin (a) circuito de ponte (b) voltímetro.

c) Forças eletromotrizes térmicas parasitas

Força eletromotriz térmica (f.e.m.t) aparece nos pontos de contato de metais dissimilares submetidos a gradientes de temperatura. Tais pontos de contatos existem em junções de condutores, chaves com relés, ou terminais de entrada (bornes) dos instrumentos. Como o cobre é o metal mais freqüentemente empregado em contatos, os pares concernentes mais encontramos são /48/: Cu-Cu ($<0,2 \mu\text{V/K}$), Cu-Ag ($0,3 \mu\text{V/K}$), Cu-Pb/Sn (1 a $3 \mu\text{V/K}$), Cu-Kovar ($40 \mu\text{V/K}$), Cu-Si ($400 \mu\text{V/K}$), Cu-CuO ($1000 \mu\text{V/K}$). Para circuitos c.c. o erro (Δt_{AB}) introduzido devido a força eletromotriz térmica parasita para cada par de junção em série no circuito é dado por:

$$\Delta t_{AB} = \frac{E_{AB}}{S_s} \quad (\text{eq. 3.1})$$

onde:

E_{AB} ... força eletromotriz térmica do par

S_s ... sensibilidade do transdutor

A significância de tal fonte de erro é facilmente avaliada se observado que termopares do tipo Pt-PtRh têm sensibilidade de aproximadamente $7 \mu\text{V/K}$, enquanto o par Cu-CuO (cobre-óxido de cobre tem f.e.m. térmica da ordem de $1000 \mu\text{V/K}$).

d) *Offsets e drifts*

Tensões e correntes de *offsets* são fontes de interferências desenvolvidas nos terminais de entrada dos instrumentos, e mais significativamente nos amplificadores /60,61/.

Embora a ordem de grandeza de tais fontes sejam normalmente fornecidas pelos fabricantes, somente a análise do processo de

medição pode determinar a sua real contribuição na composição da incerteza. Por exemplo, na interligação de transdutores a amplificadores, as correntes de *offsets* geram tensões parasitas no modo diferencial sobre o transdutor, fios de transmissão e eventuais chaves de multiplexação. É mais crítico quando a impedância do transdutor é elevada (ex.: termistor em baixa temperatura)

A maioria dos parâmetros elétricos mostram um comportamento dependente da temperatura, tempo e tensão de alimentação; e são caracterizados como *drifts*. A influência da temperatura nos parâmetros é geralmente especificada pelos fabricantes em termos de coeficiente de temperatura. O *drift* do tempo, devido ao envelhecimento dos componentes, é aleatório e não acumulativo (ex.: o *drift* especificado pelo fabricante é de $15 \mu\text{V}/\text{mês}$, o *drift* resultante após um ano, geralmente, não excede $50 \mu\text{V}$). Uma das maneiras de extrapolar esse valor é dividir o valor especificado pelo fabricante pela raiz quadrada de sua proporção pelo intervalo de interesse /58/. Modelos matemáticos, são utilizados para predizer o *drift* do tempo, especialmente, para longas sessões de medição, em casos de instabilidade das condições térmicas, que podem causar variações da temperatura ambiente. Neste caso o *drift* do tempo, pode ser considerado como uma função exponencial, isto é justificado pela variação exponencial durante o processo de aquecimento /62/.

e) Ruído

Dentre os tipos de ruídos mais comuns a componentes eletrônicos (ruídos Shot, Flicker e Johnson), o ruído Johnson (térmico) é o mais importante, pois está presente em todos elementos contendo resistência /54,63,64,65/. É gerado pela agitação térmica dos

elétrons nos dispositivos condutores de maneira geral. A equação 3.2 define a tensão de ruído Johnson, como /46/:

$$V_J = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (\text{eq. 3.2})$$

onde:

V_J ... tensão de ruído Johnson

k ... constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

T ... temperatura

R ... resistência

Δf ... largura de banda

A figura 3.3 apresenta a tensão de ruído Johnson em função da largura de banda para vários valores de resistência (R).

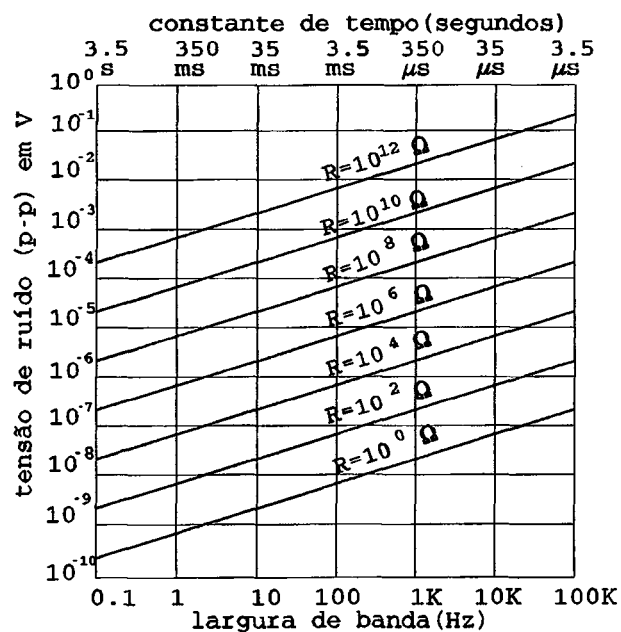


Figura 3.3 - Tensão de ruído Johnson.

A largura de banda do ruído é aproximadamente igual a:

- . 1 Hz em medidores de painel analógico;
- . a metade da taxa de conversão (leituras/segundo) em voltímetros integradores digitais;

. $\Delta f = 1/4RC$, em circuitos de alta resistência, onde a largura de banda é limitada pela constante de tempo da resistência equivalente do circuito de entrada e a capacitância de entrada do sistema de aquisição de sinais.

Como fenômenos termodinâmicos são, na maioria das vezes, de baixa frequência (0.1 a 10 Hz), a taxa de aquisição não deve ser extremamente alta na termometria automatizada sob pena de aumento desnecessário do erro devido ao ruído Johnson.

De modo geral, na termometria automatizada, a tensão de ruído Johnson é menor que $0,1 \mu V$, devido ao baixo valor de resistência combinado com a baixa frequência.

Ambas, largura de banda e resistência devem ser limitadas para reduzir o ruído. Tal pode ser realizado nas situações práticas utilizando-se filtros passa baixa.

f) Tensão de modo comum

A tensão de modo comum (VMC) aparece, em geral, em função da alimentação de transdutores passivos e do acoplamento capacitivo da rede de 60 Hz com o circuito de medição. A VMC é convertida em diferencial devido à assimetria do circuito de medição. Neste caso, são geradas tensões de modo diferencial que se acham superpostas à tensão que se deseja medir (fig. 3.4) /60/. Podem ocorrer, também, quando o transdutor não está isolado eletricamente e está em contato direto com uma fonte de tensão, como por exemplo, em um banho aquecido por uma corrente elétrica, em especial quando usados termopares com a junção de medição exposta ou aterrada.

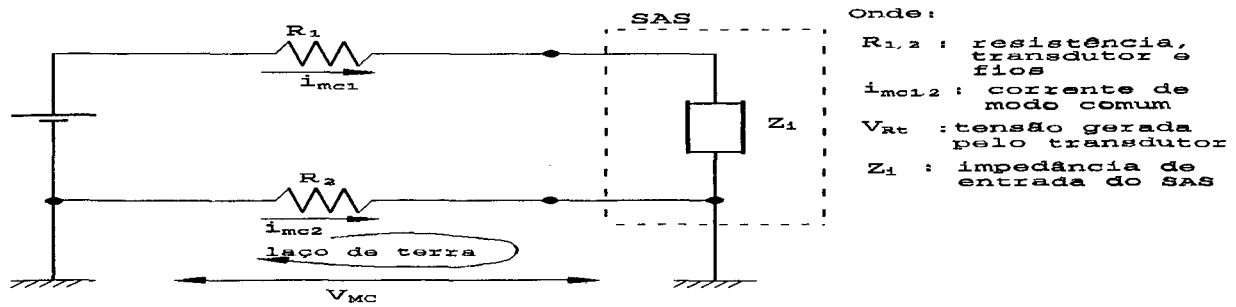


Figura 3.4 - Conversão da tensão de modo comum em diferencial.

O erro relativo devido a esse efeito pode ser expresso por:

$$E = \frac{V_{MC}/RRMC}{V_D} \quad (\text{eq. 3.3})$$

onde:

V_{MC} ... tensão de modo comum

V_D ... tensão de modo diferencial

$RRMC$... razão de rejeição de modo comum

A razão de rejeição de modo comum é muito importante, pois expressa quantitativamente a influência do sinal de modo comum sobre a amplificação da tensão diferencial. É expressa numericamente pela razão entre o ganho de modo diferencial e modo comum, e é devida ao desbalanceamento do circuito interno de amplificação. Um problema adicional é o efeito do desbalanceamento das resistências do circuito externo ao amplificador na redução da $RRMC$, quanto maior for a impedância de entrada do amplificador menor é o efeito do desbalanceamento /60/.

Guarding e blindagem ativa são as técnicas mais eficientes empregadas pelos fabricantes de instrumentos para, em conjunto com a alta $RRMC$, minimizar tal efeito /52/.

g) Interferências de campos magnéticos e elétricos

Interferências de campos elétricos e magnéticos, irão provocar o aparecimento de sinais indesejáveis no circuito de medição, em especial na transmissão do sinal do transdutor /66/. Nos casos reais, sua quantificação para efeito de avaliação da incerteza é bastante difícil. Em geral, o nível de interferência dependerá da proximidade das fontes de interferências (tais como: transformadores, motores, lâmpadas fluorescentes), amplitude do sinal e configuração do circuito de medição. Técnicas de minimização radical de tais efeitos se tornam necessárias, tais como /67,68/:

- . blindagem - anteparo destinado a proteger o circuito de medição de campos eletrostáticos externos e minimizar os efeitos de campos magnéticos;
- . trançar os fios - para minimizar interferências magnéticas;
- . filtros - atenuam interferências externas e internas aos circuito de medição que se manifestam na forma diferencial;
- . modulação - importante em aplicações de termistores ou termorresistores quando configurados em ponte. Permite que o sinal seja transmitido numa banda bem superior à frequências de tais interferências.

3.1.2. Fontes de Erros Específicas da Automação

Basicamente, as fontes de erros específicas da automação são decorrentes da multiplexação e da conversão A/D.

a) Multiplexação

A multiplexação de transdutores é procedimento freqüente na

aquisição automatizada de sinais de medição, pois o circuito é mais simples e barato do que se cada transdutor tivesse sua própria unidade de tratamento de sinal. No entanto, quando há multiplexação de transdutores existe o risco de que grandes erros estejam sendo introduzidos na medição.

A análise dos erros inerentes ao circuito de multiplexação é feita com base em modelos matemáticos estabelecidos a partir dos modelos elétricos equivalentes das configurações práticas mais usuais. São analisados os circuitos onde a multiplexação se dá antes da amplificação. De fato, em configurações em que a multiplexação é depois da amplificação, esses efeitos são muito menores, deixando de ser objeto de análise neste trabalho.

Todos elementos, contato-bobina (chave eletromecânica) ou a própria corrente de base (para chave semicondutora) podem ser representados por uma fonte de corrente (corrente de fuga). O valor pode variar desde ± 50 pA (chave eletromecânica) à ± 1 nA (chave semicondutora) /69/. A tensão de *offset* gerada pela corrente de fuga em circuitos de alta impedância (termistor e multiplexador semicondutor) é da ordem de microvolt ou até mesmo milivolt, o que pode ser extremamente crítico do ponto de vista de incerteza concernente /70,71/.

O erro devido à multiplexação para transdutor tipo termopar, pode ser subdividido em: erro devido à corrente de fuga combinada (Iofdif) e erro devido à força eletromotriz térmica.

Para sensores resistivos, o erro associado ao módulo de multiplexação é função do tipo de ligação. As configurações práticas

mais usuais são: medição a 4 fios e a 2 fios.

Para medição a 4 fios o erro devido à multiplexação pode ser subdividido em 5 parcelas: erro devido às resistências em paralelo, erro devido à influência da corrente de fuga combinada na sensibilidade, erro devido a tensão de offset gerada pelo produto da corrente de fuga combinada pela resistência de contato fechado da chave, erro devido a tensão de offset gerada pelo produto da corrente de fuga combinada pela resistência dos fios de ligação e erro devido a força eletromotriz térmica.

Para medição a 2 fios o erro devido à multiplexação pode ser subdividido em 5 parcelas: erro devido às resistências em paralelo; erro devido à influência da corrente de fuga combinada na sensibilidade; erro devido à resistência de contato fechado da chave; erro devido à resistência dos fios de ligação; e, erro devido a tensão termoelétrica.

Outra parcela de erro resultante do circuito de multiplexação é o *crosstalk*, onde a fonte de interferência é o canal adjacente. É mais significativo em medições dinâmicas. *Tree-switching* é uma técnica utilizada por alguns fabricantes para minimizar o efeito do *crosstalk* pois reduz as capacitâncias entre canais /72/. Outro erro relacionado com o canal adjacente é devido à diferença de tensões entre os canais consecutivos chaveados, é referido como *crosstalk* estático e está relacionado com o procedimento de medição /73/.

b) Conversão A/D

Em termos de composição da incerteza de medição a conversão A/D

não é crítica, haja vista que as frequências envolvidas na termometria são baixas, permitindo o uso de conversores de dupla rampa e implicando pouca preocupação com *aliasing*. Conversores de 12 *bits* e até mesmo de 10 ou 8 *bits* são, quase sempre, satisfatórios para processos industriais. Preocupação maior fica por conta da impedância de entrada do módulo de conversão quando são empregados termistores em baixas temperaturas, já que em tais situações a impedância equivalente à saída do transdutor, assume valor relativo consideravelmente alto.

3.2. FONTES DE ERROS ADICIONAIS

Muitos dos erros são específicos do transdutor e situações particulares, podem ser identificados como fontes de erros primários.

3.2.1. Fontes de Erros Características dos Transdutores Elétricos

a) Termopar

Dentre as principais fontes de erros associadas à termometria elétrica, citam-se:

- . junção de referência. - A profundidade de imersão e tensões voltaicas são as principais fontes de erros no uso de banho de gelo e ponto triplo da água. Em circuitos de compensação deve-se considerar os erros devido ao gradiente de temperatura nos bornes de ligação e os erros específicos do transdutor utilizado para a medição da temperatura de referência (por exemplo: para transdutores tipo circuito integrado (IC), os erros devido ao auto-aquecimento para um IC com substrato de metal a 25 °C em banho de óleo é de aproximadamente 0,06 K, e de 0,7 K em ar /17/);

. não homogeneidades. - O erro proveniente da não homogeneidade dos fios, varia com o tipo de termopar e com o gradiente térmico. Forças eletromotrizes térmicas parasitas podem ser introduzidas no circuito, dependendo somente da distribuição de temperatura ao longo dos fios. Podem ser devido a variações físicas, resultantes da flexão ou alongamento dos fios, os erros resultantes de tais heterogeneidades usualmente são menores que 10 K e podem ser eliminados com recozimento. Reações químicas com o meio, ou com impurezas, podem gerar desvios no característico de resposta resultante da variação da composição dos termoelementos. Essas variações são irreversíveis e podem gerar erros da ordem de centenas de graus em temperaturas elevadas /74, 10/. A equação 3.4 expressa a f.e.m. térmica em função da posição e temperatura ao longo do termopar /75/.

$$E = \int S_i(x, T) \nabla T dx \quad (\text{eq. 3.4})$$

onde:

E ... f.e.m. térmica do termopar não homogêneo

S ... coeficiente de Seebeck

T ... temperatura

x ... posição

. conversão de milivolt para graus Celsius. - Pode-se usar as tabelas de f.e.m. térmica versus temperatura (temperatura de referência a 0 °C) ou os polinômios padrão de interpolação para estabelecer o correspondente valor em graus. Em geral, quanto maior o número de pontos de calibração, menor será o erro introduzido devido a interpolação /73/.

b) Sensores resistivos

Dos sensores resistivos os termorresistores de platina (PRTD) são os mais amplamente empregados, em contrapartida, são os mais frágeis. A alteração de todo característico de resposta do termorresistor de platina, na prática observável pela medição da resistência em uma dada temperatura qualquer, por exemplo a 0 °C, pode ser devido a mudanças em sua pureza, seu estado físico e dimensional.

Para sensores tipo termistor, podem ser significativos, os erros de interpolação que variam conforme a equação e a faixa utilizada. Para a equação de Steinhart-Hart, a mais comumente empregada, a incerteza devido à interpolação é de ordem de $\pm 0,02$ K na faixa de 0 a 100 °C /17/.

Os erros comuns aos sensores resistivos são devidos: ao auto-aquecimento provocado pela corrente de excitação e os decorrentes do circuito utilizado (ponte de Wheatstone ou ohmímetro):

b.1) Auto-aquecimento

A magnitude do erro devido ao auto-aquecimento (ΔT_{aq}) depende da potência gerada no sensor e fios ($P=I^2R$) e das condições de transferência de calor entre o sensor e o meio /76/. Esse erro pode ser expresso por /77/:

$$\Delta T_{aq} = P \times S \quad (\text{eq. 3.5})$$

onde:

S ... coeficiente de auto-aquecimento do sensor (K/mW)

O coeficiente de auto-aquecimento para um PRTD ($R_0=100 \Omega$), varia, em geral, de aproximadamente de 0,02 K/mW em ar ($V=1\text{m/s}$) à

0,7 K/mW em ar parado /16/. Para um PRTD ($R_0 = 450 \, \Omega$) com uma corrente de 25 mA esse erro é de aproximadamente 0,2 K, quando imerso em oxigênio líquido /17/. Para termistores o coeficiente de auto-aquecimento (valor típico) é de aproximadamente 1 K/mW no ar e de 0,1 K/mW em líquido agitado /38/.

b.2) Circuitos de ponte

O erro de não linearidade é inerente aos sensores resistivos tipo termistor, em função de sua alta sensibilidade. Uma das maneiras de minimizar esse efeito, é selecionar adequadamente o resistor paralelo (R_1) ao transdutor no circuito, definindo 3 pontos (T_1 , T_2 e T_3) na faixa de temperatura de interesse (fig. 3.5).

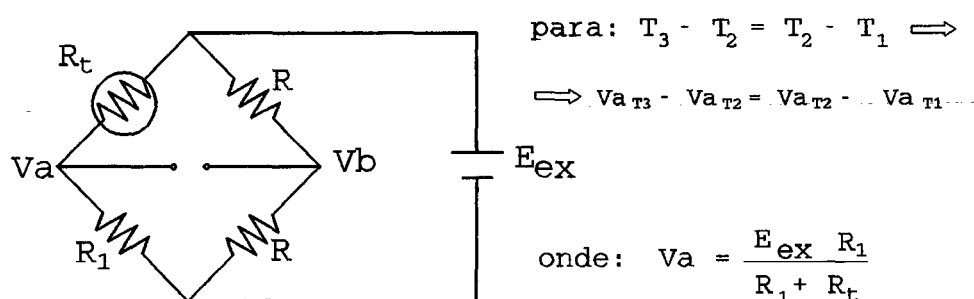


Figura 3.5. - Técnica para minimizar o erro de não linearidade para termistores.

A tensão V_a aumenta com a temperatura (diminuindo R_t), enquanto V_b é fixo. Usando esse método, o erro de não linearidade resultante é de aproximadamente 0,07 K na faixa de 10 a 30 °C e 2,5 K entre 0 a 70 °C, para transdutores tipo termistor /38/.

Para o termorresistor de platina ($R_0 = 100 \, \Omega$) na faixa de 0 a 100 °C, usando resistores fixos (R_2 e R_1) consideravelmente maior (utilizando uma relação de resistências de 10:1) do que R_t , e fazendo

o balanceamento da ponte no ponto médio da faixa de temperatura, esse erro é de aproximadamente 0,5 K (fig. 3.6) /17/.

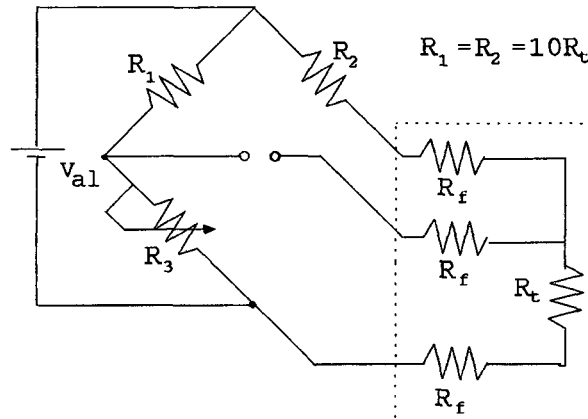


Figura 3.6. - Técnica para minimizar o erro de não linearidade para termorresistores.

Qualquer variação na resistência em paralelo à resistência do transdutor (R_t) no circuito da ponte, devido à variação de temperatura (ΔT), será adicionada a R_t , e o erro resultante (ΔE_R) é dado por /20/:

$$\Delta E_R = (\Delta T) \frac{\alpha_R}{\alpha_{Rt}} \quad (\text{eq. 3.6})$$

Onde $\alpha_{R,Rt}$ são os coeficientes de resistência à temperatura da resistência em paralelo e da resistência do transdutor, respectivamente.

A resistência dos fios (R_f) e suas variações devido a temperatura, quando não compensadas, também são adicionadas a R_t e o erro (ΔE_{Rf}) introduzido é dado por /20/:

$$\Delta E_{Rf} = (\Delta T) \frac{Rf\alpha_f}{Rt\alpha_t} \quad (\text{eq. 3.7})$$

Com respeito à alimentação, tem-se presente os erros que resultam da queda da tensão de alimentação devida à relação de impedâncias entre a resistência da fonte adicionada às resistências dos fios e suas variações, e a resistência equivalente do circuito da ponte /70/. Esse efeito é mais crítico para transdutores tipo termorresistor devido a sua resistência mais baixa. Quando possível deve-se evitar o uso de sistemas distantes, ou empregar fontes com realimentação para compensar a queda de tensão devido aos fios de alimentação.

c) Fontes de erros comuns aos transdutores elétricos

As principais fontes de erros comuns aos transdutores elétricos são:

- . efeito de haste.- Trata do resfriamento geral da região próxima ao transdutor pela condução de calor do corpo via a haste inteira, incluindo bainha, fios e isolantes internos. A amplitude do erro dependerá da profundidade de imersão, da diferença de temperatura entre o sensor e o meio, e das características de transferência de calor do termômetro. Dados práticos mostram que o erro pode chegar a 1 K e aumenta em gases e fluídos parados, sensores em poços termométricos e tubos de proteção /38/. Recomenda-se que o material da bainha do transdutor e do meio sob medição sejam iguais, a fim de melhorar as condições de transferência de calor entre o transdutor e o meio;
- . efeito de auto-resfriamento. - É similar ao efeito de haste. Esse efeito de auto-resfriamento envolve somente o resfriamento via sensor, e pode afetar significativamente a medição, quando a resistência de contato entre o meio e o sensor (R_c) não é suficientemente pequena. O uso do sensor de temperatura com fios

para o ambiente externo gera um pequeno fluxo de calor (Q) do meio sob medição via sensor e fios. O fluxo de calor deve ser pequeno para permitir que a temperatura do meio (T_m) não seja afetada, assim como, diminuir a queda da temperatura do meio via sensor. O equilíbrio térmico com o meio pode ser expresso por /78/:

$$T_s \leq T_m - \dot{Q}R_s \quad (\text{eq. 3.8})$$

onde T_s é a temperatura do sensor;

- . resistência da isolação. - A resistência da isolação diminui exponencialmente com o aumento da temperatura, assim, em temperaturas elevadas pode-se criar uma junta virtual. Impurezas dentro da isolação podem difundir para os termoelementos e sensores resistivos (principalmente em fios de platina) alterando suas características físico-químicos e, conseqüentemente, o característico de resposta. A resistência da isolação deve ser adequada, para prevenir laços de terra no circuito de medição /16/;
- . corrosão em alta temperatura. - Vários tipos de oxidação podem ocorrer com o aumento da temperatura. A taxa e o tipo de óxido depende da atmosfera e do material utilizado, e se manifestam sempre em maior intensidade em temperaturas elevadas (ex.: oxidação ao ar, por vapor, por gases de combustão, por hidrogênio e por carbonetação /13/.

3.2.2. Fontes de Erros Relacionadas com a Aplicação

A análise dos problemas na medição de temperatura relacionados com a aplicação é imprescindível. Citam-se como exemplos: medição de temperatura em escoamento de fluidos e de superfície.

a) Medição de temperatura em escoamento de fluidos

Basicamente, os erros em aplicações que envolve escoamento de fluidos são devidos às condições de transferência de calor entre sensor-ambiente e aos problemas relacionados com medição de temperatura estática em escoamento de fluidos com o transdutor estático. As principais fontes de erros estão relacionadas com a velocidade do fluido, condução de calor e radiação /17/. Deve-se, ainda, estimar a frequência de Strouhal, no caso de fluido incompressível, para garantir que esta não coincida com a frequência natural do material do suporte do sensor, no caso de termorresistores, resultando na ruptura do suporte e danificando o sensor /79/.

b) Medição de temperatura de superfície

Qualquer aparato próximo ou em contato com a superfície do meio sob medição altera as condições de transferência de calor entre a área da superfície e seu ambiente. A relação entre as condutâncias do transdutor e do meio sob medição é um dos parâmetros mais importantes, pois estabelece a maneira pela qual ocorre a passagem de calor do meio sob medição para o transdutor, e deste para o meio ambiente. Outro parâmetro importante é a relação entre as condutâncias do meio ambiente e do meio sob medição (n° de Biot). Por exemplo, o erro na medição de temperatura de uma chapa de aço AISI 1010 à 100 °C para um termopar de 3,3 mm de diâmetro é de aproximadamente 4 K para um tipo T, de 1,2 K para um tipo J e de 0,7 K para um tipo K.

3.3. PROPOSTA DE MODELO PARA ANÁLISE DOS ERROS

Apesar da grande diversidade de parâmetros envolvidos na medição de temperatura e de serem as mais variadas as condições de contorno,

é possível representar um modelo genérico que permita a análise do transdutor ao conversor A/D, das fontes de erros comuns aos sistemas de medição elétricos e específicas da automação (fig. 3.7) /45/.

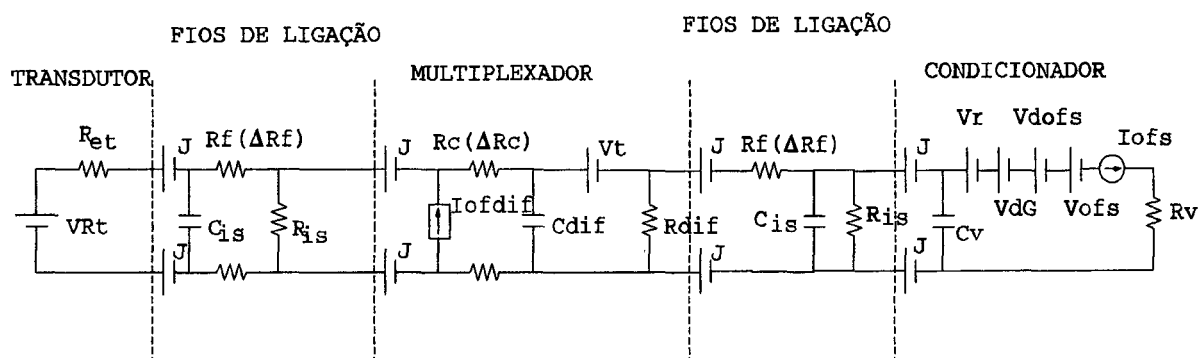


Figura 3.7. - Modelo elétrico genérico na aquisição automatizada de sinais de baixa freqüências com transdutores elétricos.

Para efeito de análise, não entraram no equacionamento os parâmetros que são dependentes do ambiente na qual se faz a medição (tais como: força eletromotriz térmica nas junções transdutor-fios de ligação-contatos (J), interferências decorrentes de campos magnéticos e elétricos e os *drifts* de tempo da tensão de offset do condicionador e *drifts* da tensão de alimentação. Em uma aplicação real devem ser considerados no equacionamento ou serem utilizadas técnicas que garantam a sua pequena influência se comparadas às outras fontes /67,68/. Todos os cálculos foram baseados nos valores típicos apresentados nas figuras 2.29 e 3.1.

3.3.1. Modelo Elétrico Equivalente para Termopares

O modelo elétrico equivalente para a medição de temperatura com termopares está representado na figura 3.8.

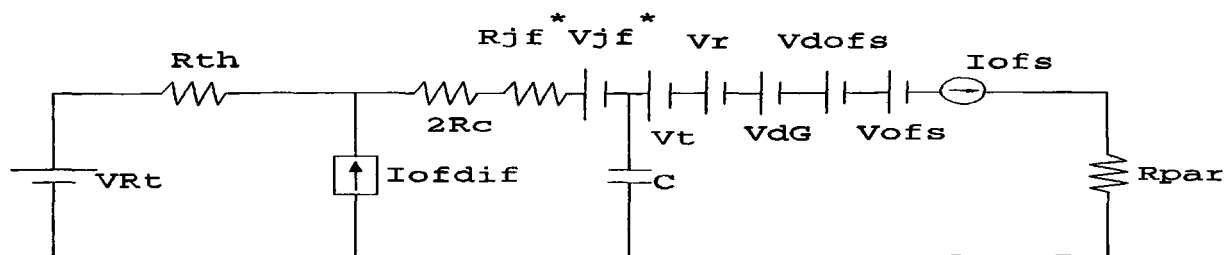


Figura 3.8. - Circuito elétrico equivalente na aquisição automatizada de dados com termopares.

Nota: (*) Junta fria - compensação por hardware

O erro devido à retroação no sinal do transdutor é da ordem de milikelvin para uma resistência equivalente (resistência transdutor, fios e contato fechado da chave) de $300\ \Omega$ e $R_{par} = 10^6\ \Omega$ e aumenta para $0,1\ K$ para uma resistência equivalente (R_e) igual a $6\ k\Omega$ (quando utilizado com multiplexador semicondutor). Na maioria das aplicações este efeito é insignificante ($<0,001\ K$), a não ser quando é usado multiplexador semicondutor ($R_c = 3\ k\Omega$) e quando a resistência em paralelo (R_{par}) é da ordem de megaohms ou menor.

A equação 3.9 descreve o erro devido à corrente de fuga combinada (I_{ofdif}) somada à corrente de offset (I_{ofs}).

$$E1 = \frac{R_{th} \times (I_{ofdif} + I_{ofs})}{S_s} \quad (\text{eq. 3.9})$$

Esse erro é maior para termopares com baixa f.e.m. térmica e quando a corrente resultante (I_t) de tal soma é da ordem de nanoampère. Para $R_e = 6\ k\Omega$ e $I_t = 2\ nA$, a tensão gerada é de $12\ \mu V$, e o erro equivalente é de $0,2\ K$ (termopares tipo E e J), de $0,3\ K$ (termopar tipo K e T) e de $1,8\ K$ para termopares tipo S e R a $20\ ^\circ C$.

A força eletromotriz térmica diferencial da chave, tensão de

offset, ruídos, *drifts de offsets* (vs. temperatura), são críticos quando a sensibilidade do termopar é muito baixa (ex.: à temperatura de 300 °C, o erro equivalente a uma tensão de 4 μV para termopar tipo E é de 0,05 K e para termopar tipo S, de 0,4 K).

3.3.2. Modelo Elétrico Equivalente para Termômetros Resistivos

Para o termorresistor de platina ($R_0=100\Omega$) o valor da corrente adotada é de 1 mA (conforme recomendado pela norma BS 1904). Para o termistor (omega 44007 - $R_{25^\circ\text{C}}=5000\Omega$) os valores adotados, mais comumente empregados por alguns fabricantes são: $I=100\text{nA}$ (3G Ω), $I=1\mu\text{A}$ (3M Ω), $I=10\mu\text{A}$ (300k Ω), $I=100\mu\text{A}$ e 1 mA (3k Ω). O número máximo de transdutores isolados por bloco adotado para o cálculo dos erros é 10 (número encontrado em muitos dos sistemas disponíveis no mercado), chamando-se atenção para o fato de que o erro aumenta a medida que N aumenta. O modelo é válido para circuitos ponte de Wheatstone.

a) Medição a 4 fios

A figura 3.9 representa o modelo equivalente para medição a 4 fios com sensores resistivos.

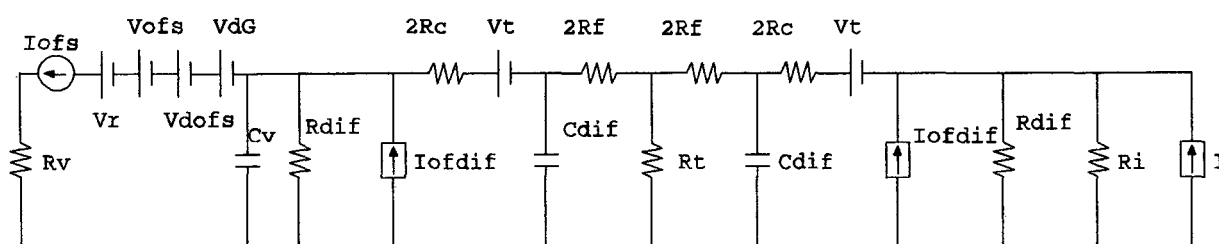


Figura 3.9. - Circuito elétrico equivalente na aquisição automatizada de dados com sensores resistivos (medição a 4 fios).

O erro devido às resistências em paralelo varia de acordo com os valores das resistências de entrada da unidade de condicionamento de sinal, da resistência da fonte de corrente, e da resistência entre *high* e *low*.

As figuras 3.10 e 3.11 apresentam esse erro para termistores e termorresistores em função da temperatura.

Erro devido as resistências em paralelo (K)								
T(°C)	Influência R _i		Influência R _I		Influência de R _c			
	a1	a2	b1	b2	R _c =3k	R _c =250	R _c =125	R _c =50
-80	0.9	1.3	1.6	8.0	1.6	1.6	1.6	1.6
-60	0.2	0.3	0.3	2.0	0.3	0.3	0.3	0.3
-40	0.06	0.08	0.1	0.6	0.1	0.1	0.1	0.08
0	0.01	0.01	0.01	0.10	0.01	0.015	0.015	0.016
10	0.008	0.01	0.01	0.08	0.01	0.009	0.009	0.012
50	0.005	0.008	0.009	0.05	0.009	0.003	0.002	0.008
100	0.005	0.009	0.009	0.05	0.009	0.001	0.001	0.009
150	0.007	0.01	0.01	0.06	0.01	0.001	0.001	0.012

Figura 3.10. - Erro devido às resistências em paralelo medição a 4 fios (termistores), em função da temperatura a medir.

Nota: Influência de R_i (R_v=R_I=R_{is}=10⁹ Ω); a1:R_i=10⁹ e a2:R_i=10⁸ Ω.

Influência de R_I (R_v=R_i=10⁸ e R_{is}=10⁹ Ω); b1:R_I=10⁹ e a2:R_I=10⁸ Ω.

Influência de R_c (R_i=R_v=10⁸ e R_I=R_{is}=10⁹ Ω).

O erro devido às resistências em paralelo pode expresso por:

$$E2 = \frac{VRT}{I} - \frac{VRT}{I - IRt'} \quad (\text{eq. 3.10})$$

Verifica-se que a resistência de contato, a resistência combinada entre o *high* e *low*, e a resistência da fonte de corrente são os parâmetros que influenciam mais significativamente a magnitude do erro.

Erro devido às resistências em paralelo (K)				
T (°C)	I%=0.015	I%=0.15	I%=0.3	I%=1,6
-200	0.006	0.06	0.1	0.7
-100	0.02	0.2	0.5	2
0	0.04	0.4	0.8	4
100	0.05	0.5	1.1	5
200	0.07	0.7	1.4	7
300	0.08	0.8	1.8	9
400	0.10	1.0	2.1	11
500	0.12	1.2	2.5	13
600	0.14	1.4	2.9	15
700	0.16	1.6	3.4	18
800	0.18	1.8	3.8	20

Figura 3.11. - Erro devido às resistências em paralelo medição a 4 fios (termorresistor de platina), em função da temperatura a medir.

Nota: %I=0.015 (RI=Ri=Ris=10⁹ Rv=10⁹, 10⁸ e 10⁷ Ω)

%I=0.15 (RI=Ris=10⁹ Rv=10⁹, 10⁸ e 10⁷, Ri=10⁷ Ω)

%I=0.3 (Ris=10⁹ RI=10⁸ Rv=Ri=10⁸ e 10⁷ Ω)

%I=1.6 (RI=10⁷ Ris=10⁹ Rv=Ri=10⁸ e 10⁷ Ω)

O erro devido à corrente resultante It na sensibilidade pode ser expresso por:

$$E3 = \frac{VRt}{I} - \frac{VRt}{I \pm (2 \times I_{ofdif} + I_{ofs})} \quad (\text{eq. 3.11})$$

O erro correspondente para o termorresistor é de aproximadamente 0,001 K (It=0,5 nA), de 0,01 K (T>300 °C) para It=10 nA e 0,1 a 2 K (-200<T<850 °C) para It=0,6 μA. A figura 3.12 apresenta os resultados obtidos para o termistor.

Dos resultados obtidos, conclui-se que o erro devido a corrente total (It) na sensibilidade é função da corrente fornecida pela fonte de corrente. Tal erro cresce significativamente para valores usuais de corrente da fonte da ordem de nanoampère. Para o termistor, o erro aumenta em temperaturas abaixo de 0 °C devido à diminuição de I.

Erro devido a It (K)			
T (°C)	It= 50pA	It= 1nA	It=65nA
-80	0.1	2.0	33
-70	0.1	2.2	36
-60	0.01	0.25	11
-50	0.015	0.30	12
-40	0.001	0.03	1.8
-30	0.001	0.03	1.9
-20	0.001	0.03	2.1
-10	0.0002	0.004	0.24
0	0.0002	0.004	0.25
10	0.0002	0.004	0.27
50	0.00003	0.001	0.03
100	0.00003	0.001	0.05
150	0.00004	0.001	0.06

Figura 3.12. - Erro devido à corrente resultante (It) na sensibilidade de transdutores tipo termistor.

O erro devido à queda de tensão sobre as resistências de contato fechado da chave e fios de ligação podem se expressos por:

$$E4 = \frac{VRC}{I} \quad (\text{eq. 3.12})$$

$$E5 = \frac{VRf}{I} \quad (\text{eq. 3.14})$$

O erro correspondente na medição com termorresistor é de aproximadamente 0,01 K (It=10 nA) e de 0,001 K (It=0,6 μA) para $R_c < 300 \, \Omega$. E varia de aproximadamente 0,04 à 0,2 K (It=10 nA) e de 1,5 a 1,4 K (It=0,5 μA) para $1k < R_c < 3k \, \Omega$. Para termistor ($R_{25^\circ C}$) é de aproximadamente 0,002 K (It=10 nA) para $R_c < 300 \, \Omega$ e de 0,01 à 2 K para $1k < R_c < 3k \, \Omega$ (It=0,6 μA). Dos resultados obtidos, verifica-se as tensões devido ao produto de R_c (ou R_f) pela corrente total (It) são maiores, principalmente para multiplexadores tipo semiconductor, que apresentam maior resistência de contato.

Os erros devido à força eletromotriz térmica diferencial da chave, tensões de *offsets* e *drifts de offsets* (vs. temperatura) para o termorresistor de platina variam de 0.015 a 3,5 K e de 0.002 a 0,5 K para o termistor, para tensões de 4 μ V a 1 mV, respectivamente.

b) Medição a 2 fios

O modelo elétrico equivalente para medição de temperatura com sensores resistivos está representando na figura 3.13.

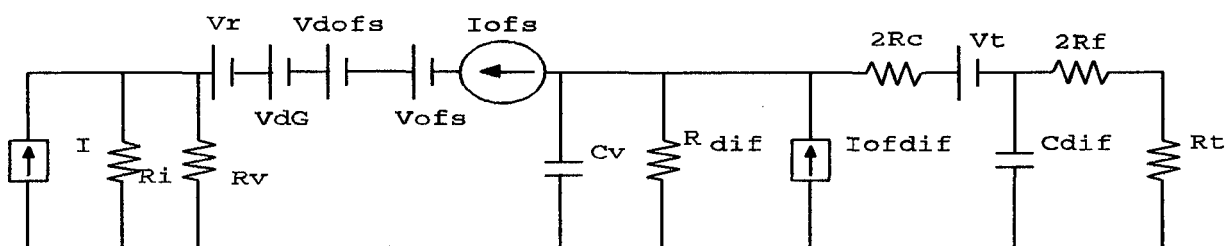


Figura 3.13. - Circuito elétrico equivalente na aquisição automatizada de dados com sensores resistivos (medição a 2 fios).

O erro devido às resistências em paralelo é um pouco menor que na medição a 4 fios, e é descrito pela equação 3.14.

$$E6 = \frac{VRt}{I} - \frac{VRt}{I - IRt''} \quad (\text{eq. 3.14})$$

A equação 3.15 e 3.16 expressam os erros, equivalentes em unidade de resistência, devido a resistência de contato fechado da chave e fios de ligação.

$$E7 = 2Rc \quad (\text{eq. 3.15})$$

$$E8 = 2Rf \quad (\text{eq. 3.16})$$

A figura 3.14 apresenta o erro equivalente, em Kelvin, devido a resistência de contato fechado da chave.

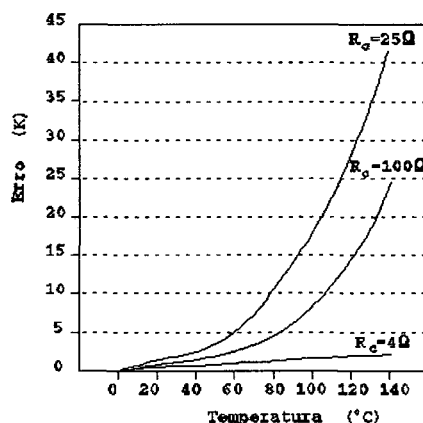


Figura 3.14. - Erro devido às resistências de contato da chave.

O erro devido à corrente resultante (I_t), é aproximadamente metade do valor correspondente à medição a 4 fios, e é descrito pela equação 3.18 e os resultados são apresentados na figura 3.15.

$$E_9 = \frac{VRt}{I} - \frac{VRt}{I \pm (I_{ofdif} + I_{ofs})} \quad (\text{eq. 3.18})$$

O erro devido à força eletromotriz térmica diferencial da chave, tensões de *offsets*, *drifts* de *offset* em função da temperatura e do ganho são os mesmos para a medição a 4 fios.

Erro devido a I_t (K)			
T (°C)	$I_t = 50\mu A$	$I_t = 1nA$	$I_t = 65nA$
-80	0.06	1.0	24
-70	0.06	1.0	26
-60	0.007	0.1	6.6
-50	0.007	0.1	7.2
-40	0.0008	0.015	0.9
-30	0.0008	0.016	1.0
-20	0.0009	0.017	1.0
-10	0.0001	0.002	0.1
0	0.0001	0.002	0.1
10	0.0001	0.002	0.1
50	0.0001	0.003	0.02
100	0.0001	0.0001	0.02
150	0.0001	0.0001	0.03

Figura 3.15. - Erro devido à corrente resultante (I_t) na sensibilidade para termistores (medição a 2 fios).

Conclui-se que em determinados sistemas usando termistores para medições de temperaturas próximas de 0 °C, e em especial abaixo de 0 °C, medição a 2 fios pode ser tão boa e até melhor que a medição a 4 fios, devido ao fato de que a influência da corrente de fuga combinada e de *offset* na sensibilidade é relativamente menor que na medição a 4 fios, contrariando procedimentos e recomendações usuais.

Dos resultados obtidos pode-se afirmar que o efeito da corrente de fuga combinada e de *offset* para sensores resistivos, é proporcional à relação: $(I_{ofdif} + I_{offset})/I_{fonte}$, fazendo com que a corrente de alimentação dos sensores resistivos não possa ser muito pequena. Para contornar o problema devido ao auto-aquecimento, recomenda-se manter as chaves fechadas o mínimo tempo necessário para aquisição.

Na multiplexação com chave semicondutora há um duplo efeito contribuindo para que a parcela de erro seja maior que na multiplexação com relé, qual seja: tanto a corrente de fuga (I_{of}), quanto a resistência de contato fechado (R_c) são normalmente muito maiores nas chaves semicondutoras.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA PARA AJUSTE DE INTERVALOS DE CALIBRAÇÃO DE TRANSDUTORES ELÉTRICOS DE TEMPERATURA

A garantia da qualidade metrológica dos instrumentos na prática é alcançada, principalmente, por meio de calibrações periódicas. Um importante aspecto da eficiência de programas para a garantia da qualidade é a determinação do intervalo de tempo adequado entre as sucessivas calibrações dos instrumentos.

Uma vez definido o intervalo de calibração inicial, a ajustagem dos intervalos de calibração deve ser possível a fim de evitar o uso de instrumentos que não estão de acordo com as condições técnicas prefixadas e calibrações freqüentes que elevam os custos e diminuem a disponibilidade dos instrumentos.

Em medição de temperatura, não existe nenhuma norma ou procedimento que possibilite a ajustagem do intervalo de calibração, a não ser na área nuclear onde normas fixam intervalos de no máximo 3 meses /80/. O intervalo de calibração depende de cada particular situação, isto tem dificultado o estabelecimento de uma metodologia

para obtenção de ciclos ótimos (intervalos que mais convenientemente atendam às necessidades), seja na indústria ou laboratórios.

No presente capítulo, são apresentados e analisados aspectos relevantes na determinação do intervalo de calibração de transdutores elétricos de temperatura. Adicionalmente, é proposta uma metodologia para ajustar os intervalos de calibração de tais transdutores, a partir da adequação de métodos propostos por terceiros: ajuste automático /81/, tempo em uso /82/, verificação durante o serviço /82/ e de critérios intuitivos (Schumacher, Greb, Glassman /83 a 86/).

4.1. ASPECTOS A CONSIDERAR NO ESTABELECIMENTO DE INTERVALOS DE CALIBRAÇÃO

Um grande número de fatores influenciam na frequência de recalibração e devem ser levados em conta. Esses fatores podem ser divididos em dois grupos /87/:

- . fatores primários (condições de armazenamento e utilização do SM, frequência de utilização, aspectos construtivos do SM, incerteza do SM em função da aplicação e recomendações de fabricantes e de normas técnicas);
- . fatores históricos (informações provenientes de calibrações e/ou serviços de manutenção a que o sistema de medição tenha sido submetido).

Para se estabelecer uma sistemática fundamentada de estabelecimento do intervalo de calibração de transdutores de temperatura tipos termopar, termorresistor e termistor, vários são os

aspectos específicos a serem considerados de cada transdutor, como é descrito a seguir.

a) Termopar

É difícil de definir uma expressão analítica da estabilidade de transdutores tipo termopar em função da presença de não homogeneidades nos termoelementos.

De uma maneira geral, a instabilidade do característico de resposta de termopares, a imersão constante, está normalmente associada com a variação da composição de cada termoelemento, em regiões sob gradiente térmico. Esta variação pode ser devido a:

- . contaminação pela atmosfera na qual está inserido o termopar;
- . contaminação pelo material de tubos de proteção e isolamento;
- . troca de elementos de liga na junção de medição quando soldada;
- . volatilização preferencial de um metal (ou óxido) de um elemento de liga no termoelemento.

A magnitude de tal variação e, conseqüentemente, da instabilidade depende dos seguintes fatores:

- . tipo de termopar;
- . temperatura;
- . tempo de exposição;
- . atmosfera;
- . área da seção transversal do fio e outros aspectos construtivos.

A influência de tais parâmetros, para cada tipo de termopar, pode ser de forma individual ou combinada, como pode-se verificar nos exemplos a seguir para termopares tipo K e R/S.

Tipo K:

- . em atmosferas contendo baixo conteúdo de oxigênio, devido ao insuficiente oxigênio necessário para formar o filme de óxido protetor na superfície dos termoelementos, ocorre corrosão, que tende a gerar um desvio negativo do característico de resposta, e é mais crítico entre 800 a 1050 °C /8/;
- . na faixa de temperatura entre 600 a 700 °C, após um período da ordem de 20 horas de exposição em atmosferas redutoras (hidrogênio), tem-se início a formação de um depósito de carbono na superfície do cromel, que aumenta com o tempo de exposição e altera drasticamente a f.e.m. térmica do termopar (erro de aproximadamente 50 a 75 °C), o que impossibilita totalmente o emprego do termopar tipo K neste tipo de atmosfera /88/;
- . entre 200 a 600 °C, os átomos de cromo e níquel no termoelemento cromel, tendem a ocupar lugares específicos na rede cristalina (estado de ordem). Acima de 600 °C, os átomos estão distribuídos aleatoriamente (estado de desordem), a transformação do estado de ordem para o de desordem, ou vice versa, é reversível; e a extensão na qual o estado de ordem é formado é dependente do tempo e temperatura (ex.: o desvio na f.e.m. térmica resultante da transformação ordem-desordem, para um termopar tipo K exposto por 720 h à 400 °C é aproximadamente 1,5 K, que corresponde a metade da incerteza normalizada nesta temperatura) /89/;
- . em termopares tipo K quando expostos entre 600 a 800 °C, em ar, há um gradual aumento na f.e.m. térmica, resultante da variação na composição predominante do cromel. Entretanto, em temperaturas acima de 1000 °C, os desvios são devidos principalmente à variação na composição do alumel. Em geral, as reações químicas aumentam exponencialmente com a temperatura e tempo de exposição, de modo que ocorrem desvios mais rápidos em temperaturas mais altas /90/;

conforme é mostrado na figura 4.1 a partir de dados experimentais /91/.

Temperatura (°C)	Desvio do característico de resposta (K)				
	Tempo de exposição (h)				
	10	175	250	1000	10000
850			6.5		
800	2.0	3.5			
700					7.0
600				5.5	

Figura 4.1. - Desvio do característico de resposta de termopares tipo K (0,5 mm de diâmetro), em ar.

Tipo R e S:

- . o uso contínuo em temperaturas acima de 400 °C, resulta em um excessivo aumento do tamanho de grão (monocristal em um agregado policristalino), que tende a tornar os termoelementos, além de mais frágeis mais suscetíveis à contaminação, produzindo um desvio negativo do característico de resposta /8/;
- . desvios negativos também são gerados devido à oxidação, difusão ou pela volatilização do ródio no termoelemento positivo, já que os átomos de ródio têm o efeito de diminuir o coeficiente de Seebeck da platina. Uma queda na f.e.m. térmica do termopar da ordem de 13 μV à 1064,43 °C (ponto de fusão do ouro) ocorrerá depois de exposto por aproximadamente 100 h, resultante da formação de óxido de ródio na porção do termopar sob gradiente térmico (entre 500 à 900 °C), e do aparecimento de vazios após a cada redução de temperatura posterior aos tratamentos térmicos recomendados pela escala prática internacional de temperatura (EPIT-68) /90/;
- . impurezas em tubos de proteção de cerâmica são uma das principais fontes de contaminação e, conseqüentemente, fonte de instabilidade devido a reações químicas, em temperaturas acima de 600 °C /92/, e

em especial acima de 1000 °C, resultante de interações químicas. Entre os principais materiais utilizados em tubos de proteção na faixa de 1000 a 1800 °C, a alumina é o material mais comumente empregado e, geralmente, apresenta pequenas quantidades de ferro, silício, sódio, cálcio e magnésio. Dessas impurezas, o ferro é o principal contaminante dos termoelementos, devido ao processo de transferência do ferro para o fio de platina, por difusão ou vaporização /93,94/.

b) Termorresistor de platina

Em termorresistores de platina, em temperaturas acima de 400 °C /95/, ocorre um aumento do tamanho do grão, redistribuição das impurezas devido à volatilização destas ou pela contaminação do fio pelo seu ambiente e alteração dimensional do fio (pela volatilização ou deformação). Aquecimento ou resfriamento rápidos podem gerar tensões externas que tendem a modificar a estrutura do grão e criar vazios na rede cristalina. Esses são os principais mecanismos de instabilidade que resultam em desvios no característico de resposta dos termorresistores e que podem se manifestar em conjunto, em diferentes faixas de temperatura /38,96/

Efeitos de ciclos térmicos em faixas estreitas de -20 a 250 °C de curta duração (aproximadamente 2 horas) e longa duração (de até 1000 horas) não resultam em significativos desvios (da ordem de 20 mK) no característico de resposta de termorresistores de platina /97/.

A figura 4.2 mostra o desvio do característico de resposta de termorresistores de platina padrão industrial para diferentes condições de temperatura e tempo de exposição.

Condições características	Desvio (K)	Ref.
T = 540°C -tempo de exposição: 1ano	0.25	/101/
Sob 10 ciclos térmicos(20 à 600°C)	<0.05	/102/
T = 600°C -tempo de exposição: 1000h	<0.1	/34/
T = 850°C -tempo de exposição: 6000h	1	/22/
Tempo de exposição: 1ano (0 à 650°C)	0.01 a 1	/30/

Figura 4.2. - Desvio do característico de resposta de termorresistores de platina industrial.

No caso de termorresistor de platina tipo filme, o desvio termométrico é aproximadamente de 0,3 K depois de submetido a 10 ciclos térmicos entre -70 a 600 °C, sendo que são mais afetados por choques térmicos do que os termorresistores de platina padrão industrial /16/. Para termorresistores de platina padrão esse desvio é da ordem de 0,3 mK /98 a 100/.

Em geral, a estabilidade do termorresistor de platina depende da estrutura cristalina e de tensões resultantes, em qualquer faixa de temperatura. Esses fatores tornam-se mais importantes a medida que a temperatura aumenta, por causa do aumento do tamanho de grão e dos efeitos da deterioração do material da isolação em temperaturas altas /101 a 104/.

c) Termistores

Os termistores exibem uma leve variação da resistência com o tempo de exposição. Este desvio termométrico ocorre em todos os termistores em maior ou menor grau dependendo da estrutura do material e da temperatura de operação. Duas são as principais causas: degradação do contato entre o material semicondutor e os elementos metálicos e variação no material do termistor. O desvio termométrico devido à degradação por contato é negativo, pois aumenta a resistência do termistor e é não constante (mostra um aumento em temperaturas elevadas), resultante de mecanismos tais como: contaminação, difusão, diferentes coeficientes de expansão térmica e micro-fraturas. O desvio devido à variação no material do termistor é geralmente constante para qualquer temperatura, resultante da variação no processo de condução do óxido semicondutor e da instabilidade cristalográfica, que tendem a alterar a sensibilidade do termistor /36,105/.

Os dois tipos de termistores mais amplamente usados são o tipo bolha e tipo disco. O comportamento do desvio é diferente para os dois tipos de termistores, devido ao processo de fabricação. Os termistores tipo bolha são os mais estáveis (aproximadamente 0,5 mK/ano). Para termistores tipo disco certos passos na fabricação são cruciais na obtenção da estabilidade, tais como /36/:

- . mistura e prensagem;
- . sinterização (temperatura e tempo);
- . taxa de resfriamento;
- . aplicação do contato, densidade e espessura do material (geralmente de prata);
- . soldagem (deve-se minimizar choques térmicos).

Em geral, o desvio é dependente da temperatura de utilização e da estrutura cristalográfica formada durante a sinterização (fig. 4.3). O encapsulamento, em parte, contribui para a estabilidade. Verifica-se que o tipo disco apresenta pobre estabilidade em temperaturas elevadas em comparação com o tipo bolha e os desvios são mais notáveis acima de 125 °C, geralmente /38/.

Condições características	Desvio	Referências
Ciclos térmicos (20 a 125°C) - tempo de exposição de 1 ano - termistor tipo bolha	0.003 K	/30/
Termistor tipo disco c/ revestimento epoxy tempo de exposição : 1000 h (T= 125°C)	0.1 K	/34/
Termistor tipo bolha c/ encaps. vidro à temperatura de 300°C (1 ano)	0.6 a 0.15 K	/34/
Temperatura ambiente - tempo de exposição de 1 ano - termistor tipo disco	0.02 K	/29/

Figura 4.3. - Desvio do característico de resposta de termistores sob diferentes condições de temperatura e tempo.

4.1.1. Intervalo de Calibração Inicial

O primeiro passo para determinar o intervalo de calibração inicial de transdutores elétricos de temperatura tipos termopar, termorresistor e termistor é analisar as características do transdutor e de sua utilização, identificando os fatores primários que influenciam no comportamento de cada transdutor (fig. 4.4).

Com base nos fatores primários, na experiência de especialistas de termometria e/ou em intervalos utilizados por outras instituições, pode se estimar o intervalo de calibração inicial.

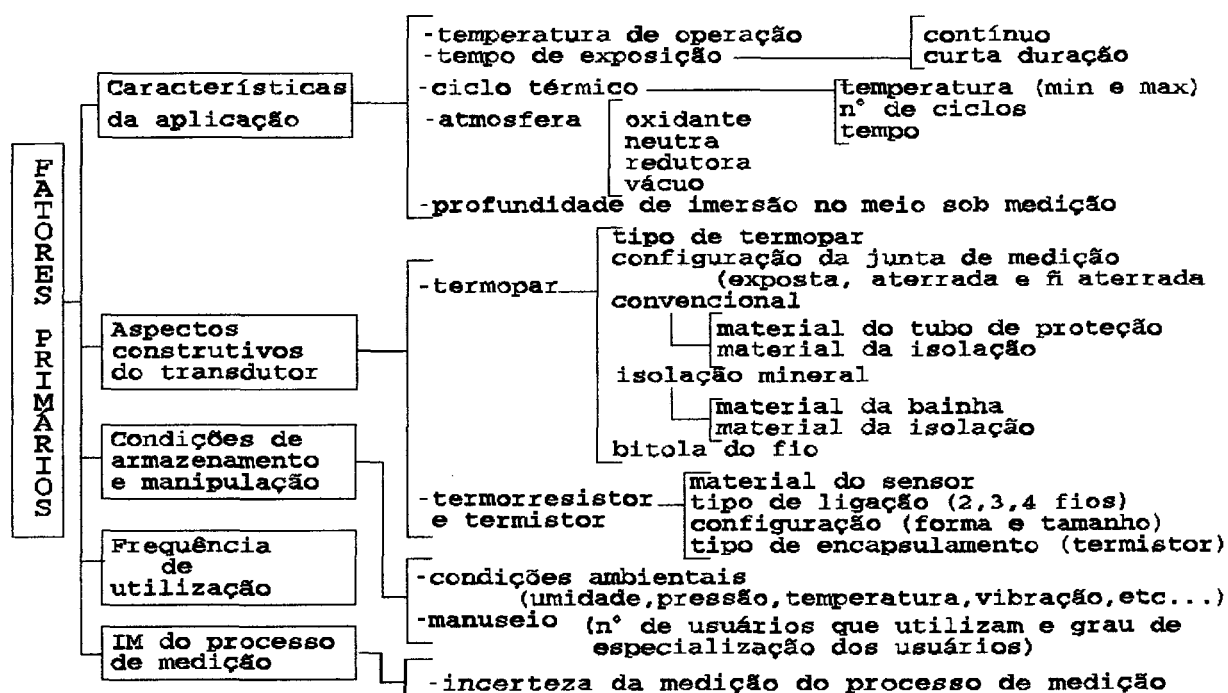


Figura 4.4 - Fatores primários específicos de transdutores elétricos (termopar, termistor e termorresistor).

Monogramas, construídos a partir de informações obtidas anteriormente específicas de um transdutor e aplicação, tais como: controle de temperatura ambiente, bancadas de ensaios, laboratórios de termometria podem auxiliar, e até mesmo se constituir em método próprio, para o estabelecimento do intervalo inicial. O intervalo inicial, pode ser determinado por interpolação linear entre as coordenadas da faixa de interesse. Esse método não se aplica para condições severas de uso e onde não é possível controlar os fatores que influenciam na estabilidade do transdutor.

A figura 4.5 mostra um monograma construído com base nos valores da figura 4.1 para o termopar tipo K (0,5 mm de diâmetro) exposto em ar /91/.

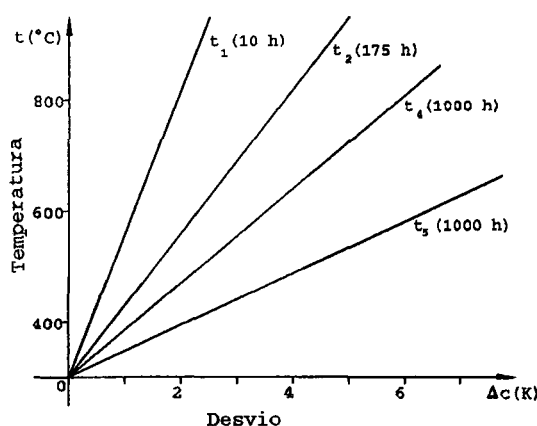


Figura 4.5. - Monograma para termopar tipo K (0,5 mm de diâmetro).

4.1.2. Métodos de Revisar Intervalos de Calibração

É imprescindível o estabelecimento de métodos de revisão dos intervalos de calibração, pois estão diretamente relacionados com o aspecto econômico das calibrações, disponibilidade dos instrumentos e qualidade das medições efetuadas /83,84/. Há diversos métodos, empíricos e estatísticos para revisar os intervalos de calibração. Dentre esses destacam-se:

- . ajuste automático /85/;
- . gráficos de controle /106/;
- . tempo em uso /82/;
- . verificação durante o serviço /82/;
- . métodos estatísticos /83 a 86/.

a) Ajuste automático

O intervalo de calibração subsequente é aumentado se o transdutor estiver dentro da incerteza de medição admissível para o processo ou reduzido se tiver fora. Apesar de produzir um rápido

ajuste do intervalo e fácil execução, devido a não necessidade de manipulação de muitos dados, quando aplicado para transdutores individualmente, exige-se um planejamento detalhado dos intervalos de calibração ou quando utilizado por um grupo de transdutores, torna-se difícil a identificação de uma manutenção preventiva, pois esse método não trata de informações das condições de utilização.

b) Gráficos de controle

Pontos de calibração significantes (pontos da faixa de interesse) são escolhidos e os resultados plotados contra o tempo em gráficos dos tipos média e amplitude, semelhantes aos de controle estatísticos de processos (CEP). A vantagem desse método é que, com base nos dados obtidos, pode-se identificar a causa dos desvios. Apresenta como desvantagem, o difícil equilíbrio do fluxo de trabalho de calibrações entre todos os transdutores. É mais conveniente para laboratórios de termometria, onde se tem condições controladas e são mais facilmente identificáveis os fatores que podem influenciar a medição.

c) Tempo em uso

O intervalo de calibração é expresso em horas de uso. A próxima calibração é executada quando se atinge o tempo de utilização especificado. A principal vantagem desse método, é que o número de calibrações, e assim, os custos variam diretamente com o tempo de utilização. Em contrapartida, é difícil ter o conhecimento antecipado de quando o transdutor deverá ser calibrado. Esse método é mais utilizado quando pode ser determinada a taxa de variação da

sensibilidade e sua instabilidade pode ser, com satisfatória segurança avaliada.

d) Verificação durante o serviço

O transdutor é verificado através de seus parâmetros mais críticos, e se estes estiverem fora de limites preestabelecidos, o mesmo recebe uma nova calibração. A grande vantagem deste método é que fornece maior disponibilidade de uso. A dificuldade está em estabelecer quais são os parâmetros críticos, como verificar tais parâmetros e quando devem ser verificado. É mais conveniente para termorresistores e termistores, devido à facilidade de monitorar a resistência em pontos fixos ou por meio de comparação com transdutor padrão. Contudo, pode implicar aumento do custo resultante da necessidade de, junto à aplicação, se dispor de mais recursos tais como ponto fixo ou transdutor padrão e de exigir pessoal especializado.

e) Métodos estatísticos

Quando se tem um grande número de transdutores idênticos calibrados, o intervalo de recalibração pode ser revisto com a ajuda de métodos estatísticos. Para esse método, tem-se a necessidade de um grande número de dados e, também, deve-se considerar a variação das condições de trabalho. Tem-se, ainda, métodos que não são puramente estatísticos, esses métodos são denominados intuitivos, pois resultam essencialmente de experiências e de tentativas válidas (ex.: método de Schumacher, Greb, Glassman).

No critério de Schumacher, cada instrumento é classificado conforme as condições em que se encontre. O próximo intervalo é determinado a partir da condição atual de recebimento e no desempenho anterior.

Para o critério de Greb instrumentos semelhantes são agrupados e divididos em 4 classes, com base no tamanho da família e no total de dados coletados. O novo intervalo é função do intervalo anterior.

O critério de Glassman, considera grandes classes de instrumentos, separando-os em subclasses, cada uma das quais com intervalos específicos. A avaliação é baseada em índice de mérito, que identifica instrumentos bons ou problemáticos.

Nenhum dos métodos apresentados anteriormente é suficiente para atender todas as necessidades de qualquer empresa ou laboratório, devido às peculiaridades que revestem cada particular aplicação. Há um grande interesse em obter o intervalo entre calibrações (I_c), por meio de modelagem matemática, e este pode ser obtido determinando a instabilidade do transdutor em pontos específicos (de interesse) na faixa de temperatura, a partir de resultados de calibrações anteriores. O intervalo entre calibrações, então, pode ser expresso de forma simplificada como /91/:

$$I_c = \frac{\Delta c}{S_{tr}} \quad (\text{eq. 4.1})$$

onde :

Δc ... desvio do característico de resposta esperado

S_{tr} ... instabilidade do transdutor (K/h)

Esta equação se aplica somente para um mesmo tipo de transdutor, mesmo ponto da faixa de operação, tipo de construção e aplicação, não se estendendo para condições extremas de uso.

Embora os transdutores de temperatura tenham pequenas componentes aleatórias de erro se comparada com a sistemática, simplificando a aplicação deste método em relação a muitos transdutores de outras grandezas, é difícil de se estabelecer os parâmetros de controle. A curva de erros deveria ser tratada como um todo dentro da faixa de interesse. Campo de boa aplicabilidade de sistemas especialistas baseados em inteligência artificial.

Para termorresistores de platina, de maneira geral, pode-se utilizar a resistência no ponto de fusão do gálio (R_{Ga}), a resistência no ponto de solidificação da água (R_0) ou a resistência no ponto tríplice da água ($R_{0,01 \cdot C}$) /103/, para monitorar a estabilidade de tais transdutores. Os possíveis mecanismos de instabilidade tais como variação dimensional, deterioração da isolação, tensões e impurezas; afetam a resistência em tais pontos. De modo geral, a variação da resistência em tais pontos, tem comportamento semelhante em outras temperaturas.

No caso de termistores, pode-se, também utilizar tais pontos de referência, principalmente na medição de temperatura na medicina e biologia (- 10 a 70 °C).

4.2. METODOLOGIA PARA AJUSTE DO INTERVALO DE CALIBRAÇÃO

A metodologia proposta é dividida em 2 etapas: caracterização e tomada de decisão. É na etapa de caracterização que se define a

forma de acompanhamento e os critérios de monitoração. Na 2ª etapa, de tomada de decisão, é estabelecida a duração do próximo intervalo.

É primordial que cada transdutor tenha um registro de sua história térmica (sob as condições de utilização e armazenamento), pois o registro de tais condições permite identificar as causas dos desvios do característico de resposta dos transdutores e se tornam base para:

- . otimizar o processo de calibração (por exemplo, tal histórico permite reduzir a verificação em transdutores que se mostram estáveis);
- . selecionar um novo transdutor mais adequado para a concernede aplicação.

4.2.1. Etapa de Caracterização

As informações relativas à etapa de caracterização estão subdivididas em 2 partes (fig.4.6):

- . critérios de monitoração;
- . forma de acompanhamento.

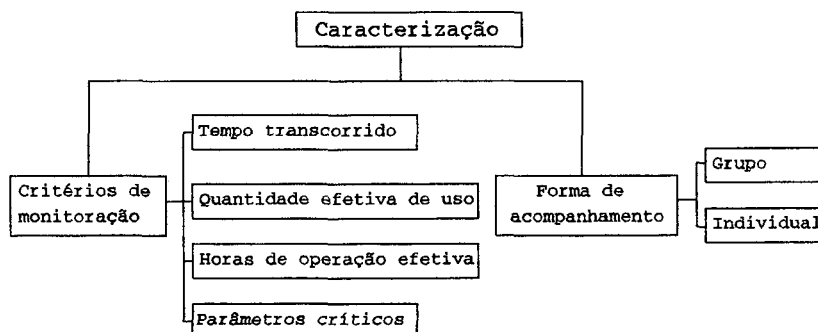


Figura 4.6. - Etapa de caracterização.

a) Critérios de monitoração

De acordo com a metodologia, o transdutor pode ser calibrado a partir dos seguintes critérios:

- . tempo transcorrido - é estabelecido um tempo cronológico fixo, como intervalo de calibração, independente do grau de utilização (ex.; parada programada para manutenção);
- . quantidade efetiva de uso - baseia-se na contagem do uso efetivo, por exemplo, para transdutores que são utilizados esporadicamente sob ciclos térmicos, como em banco de ensaios de desempenho de radiadores;
- . horas de operação efetiva - para transdutores sob condições extremas de utilização, e, eventualmente quando for facilmente contabilizado este tempo com boa margem de segurança, como em bancadas automatizadas de ensaio;
- . parâmetros críticos - verificação de parâmetros por meio de pontos fixos, tais como: resistência no ponto de solidificação da água ($0 \pm 0,001$ °C), ponto triplo da água ($0,01 \pm 0,0005$ °C) ou ponto de solidificação do gálio ($29,7646 \pm 0,0004$ °C) para sensores resistivos; ou por meio de comparação com um sistema de medição padrão. É o caso de laboratórios de transferência e industriais, onde as condições são controláveis e se dispõe de pessoal técnico especializado.

A figura 4.7 apresenta de forma sistematizada a seleção do tipo de critério de monitoração sob as condições de utilização, mais recomendado, específico de cada transdutor, a partir do estudo desenvolvido no item precedente e capítulo 2 (item 2.1).

Transdutor		Critérios de monitoração sob as condições de utilização			
		Tempo transcorrido	Quantidade efetiva de uso	Horas de operação efetiva	Parâmetros críticos
Termistor	Tipo bolha	$0 < T < 70^{\circ}\text{C}$		$T > 70^{\circ}\text{C}$ $T < 0^{\circ}\text{C}$	$0 \text{ a } 70^{\circ}\text{C}$
	Tipo disco		ciclos térmicos 20 a 70°C		$0 \text{ a } 70^{\circ}\text{C}$
Termo-resistor	Industrial	$0 < T < 650^{\circ}\text{C}$	ciclos térmicos 0 a 650°C	$T > 650^{\circ}\text{C}$	
	Filme		ciclos térmicos 0 a 650°C		
	Padrão de Referência				$0 \text{ a } 961,78^{\circ}\text{C}$
Termopar	Tipo K	$T < 200^{\circ}\text{C}$ $600 < T < 1000^{\circ}\text{C}$		$T > 1000^{\circ}\text{C}$ $200 < T < 600^{\circ}\text{C}$	
	Tipo R/S	$T > 900^{\circ}\text{C}$		$500 < T < 900^{\circ}\text{C}$	
	Tipo J	$0 < T < 500^{\circ}\text{C}$		$T > 500^{\circ}\text{C}$	
	Tipo T	$-140 < T < 350^{\circ}\text{C}$		$T > 350^{\circ}\text{C}$	
	Tipo E	$0 < T < 850^{\circ}\text{C}$		$T > 850^{\circ}\text{C}$	

Figura 4.7. - Seleção do critério do monitoração.

Nota: (1) Em termopares de pequenas diâmetros ($< 1,6 \text{ mm}$) os desvios são mais rápidos e extensivos, e em temperaturas acima de 600°C são afetados por reações químicas entre seus componentes;

(2) $961,78^{\circ}\text{C}$ - ponto de solidificação da prata.

Os critérios em discussão devem se restringir a condições previstas de operação.

Uma calibração imediata deve ser feita independentemente do critério adotado, se for constatada alguma anomalia durante a utilização do transdutor, ou se condição de operação crítica, não prevista, for atingida.

b) Forma de acompanhamento

A forma de acompanhamento dependerá da capacidade de armazenamento e correlacionamento de informações, como também, das

características de cada transdutor. O acompanhamento em grupo inclui transdutores do mesmo tipo, podem ser inclusive de fabricantes diferentes, desde que sob condições semelhantes de aplicação. É mais aplicável para transdutores tipo termorresistor, pois não há muita diferença no processo de fabricação entre fabricantes.

Para transdutores tipos termopar e termistor é mais adequado o acompanhamento individual, devido às características do processo de fabricação, como por exemplo:

- . no caso de termopares não existe uma composição química definida, além disso, tem-se os problemas de não homogeneidades que diferem de lote para lote e de fabricante para fabricante. Os intervalos apresentados para um tipo termopar não devem ser transferidos para outro tipo ou condições diferentes, pois a força eletromotriz térmica do termopar é dependente da localização do termopar com respeito ao gradiente térmico e da temperatura, devido à não homogeneidades presentes;
- . para termistores, é impossível ter controle de todas as etapas de fabricação e que são cruciais para a estabilidade do transdutor, conforme descrito anteriormente.

4.2.2. Etapa de Tomada de Decisão

A etapa de tomada de decisão, pode ser subdividida em três partes: classificação, decisão e novo intervalo.

a) Classificação

Primeiramente, cada transdutor é classificado de acordo com a condição em que é recebido na revalidação, em:

- . g - altamente estável (estabilidade da mesma ordem ou melhor do valor obtido anteriormente);
- . m - média estabilidade (há alteração, mas dentro do limite preestabelecido);
- . p - pobre estabilidade (fora do limite preestabelecido);
- . i - indeterminado (sem informações anteriores);
- . a - avaria (necessita de reparos).

A definição do limite de erro preestabelecido é fator importante, pois afeta a classificação da condição de recebimento e conseqüentemente na duração do ciclo.

b) Decisão

A decisão, com base na condição atual e no desempenho anterior pode ser representada da seguinte maneira /83/:

- . E - estender a duração do ciclo;
- . D - diminuir a duração do ciclo;
- . M - máxima redução do ciclo;
- . P - permanecer.

Através da combinação de tais condições (de pelo menos 2 ciclos anteriores) é obtida decisão a respeito do novo intervalo de calibração, conforme é mostrado na figura 4.8.

Neste caso a avaliação é aparentemente subjetiva, o que pode ser compensado, se forem agregadas informações quantitativas na classificação da condição de recebimento, tais como:

- . g - estabilidade da ordem de milikelvins/mês;
- . m - estabilidade de 0,01 a 0,1 K/mês;
- . p - estabilidade < 1 K/mês;

Ciclos Anteriores	Condição de Recebimento				
	g	m	p	l	a
gg	E	P	D	P	D
gm	P	P	D	P	D
gp	P	P	D	D	D
gi	P	P	D	D	D
ga	P	P	D	D	D
mg	E	P	D	D	D
mm	P	P	D	D	D
mp	P	P	D	M	M
mi	P	P	D	M	M
ma	P	P	D	M	M
pg	P	P	D	D	D
pm	P	P	D	D	D
pp	P	D	M	M	M
pi	D	D	M	M	M
pa	D	D	M	M	M
ag	P	P	D	D	M
am	P	P	D	D	M
ap	D	D	M	M	M
ai	D	D	M	M	M
aa	D	D	M	M	M

Figura 4.8.- Ciclo de desenvolvimento na tomada de decisão.

A decisão, para este tipo de análise, é baseada em critérios matemáticos entre os índices de estabilidade e o limite de erro preestabelecido.

Este tipo de avaliação, é mais indicado para aplicações onde se deseja conhecer a instabilidade do transdutor ao longo do tempo (laboratórios de transferência e industriais), pois exprime resultados mais confiáveis. De modo geral, a decisão a partir de resultados subjetivos preenche os objetivos da maioria das aplicações industriais.

c) Novo intervalo de calibração

A correta definição do novo intervalo, depende de fatores que são específicos de cada aplicação, transdutor, do nível de incerteza

permissível, e portanto, de difícil quantificação de maneira geral. Desta forma, a experiência é um elemento fundamental na determinação do novo intervalo.

Contudo, cabe formular algumas observações quanto ao ciclo:

- . não deve ser inferior a 4 semanas (intervalos inferiores a 4 semanas, indicam que o transdutor não é adequado para a aplicação, além de afetar a disponibilidade do transdutor) /83/;
- . não deve ser superior a 52 semanas /83/ (todos os transdutores apresentam desvios termométricos em menor ou maior grau, resultante dos mecanismos de instabilidade específicos de cada transdutor).

No caso de monitoração de parâmetros é recomendado um período de verificação de 1 semana /104/.

A figura 4.9 apresenta valores para ajuste de intervalos de calibração em função da aplicação e tolerância admissível específicos para cada transdutor, quando não se tem conhecimento de fatores históricos do sistema e no estabelecimento do intervalo de calibração inicial.

Transdutor	Aplicação	Tolerância (K)	Intervalo
Termoresistor de platina	uso contínuo em T = 650°C	± 2	3 meses
Termoresistor de platina	controle de temp. ambiente	± 0.1	12 meses
Termistor tipo bolha c/ encapsulamento de vidro	uso contínuo em T < 150°C	± 0.1	6 meses
Termopar tipo K bainha aço inox 304 (Ø 0.5mm)	uso contínuo em T = 600°C	± 3	1 mês
Termopar tipo K bainha inconel (Ø 0.5mm)	uso contínuo em T = 600°C	± 2	1 mês

Figura 4.9.- Intervalo de calibração para transdutores de temperatura tipo termopar (tipo K e R/S), termorresistor e termistor.

Calibração é um processo dispendioso e que pode ser demorado. Deste modo, calibrações freqüentes podem inviabilizar certos processos, além de afetar a disponibilidade do transdutor. Processos mais refinados requerem medições também refinadas, tendo-se assim, a necessidade de utilizar transdutores compatíveis com as exigências. Nem sempre o custo de aquisição é significativo, se comparado com o custo das calibrações. A seleção do transdutor, portanto, é o primeiro passo para racionalizar a calibração, diminuindo os gastos sem comprometer a qualidade dos resultados das medições.

CAPÍTULO 5

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DOS MÓDULOS FÍSICOS E LÓGICOS DE PROCESSOS AUTOMATIZADOS NA TERMOMETRIA COM TRANSDUTORES ELÉTRICOS

No processo de medição, o sistema de medição (SM), conjunto de elementos físicos responsáveis pela conversão da grandeza a medir em um valor numérico, desempenha papel fundamental. É necessário pois, que não só o seu tipo seja adequado mas, que a sua qualidade metrológica esteja assegurada. Contudo, sem a adoção de um procedimento sistematizado, é quase impossível tomar decisões seguras, acerca da seleção de sistemas de medição.

Tem-se visto, na prática, que na maioria das vezes a seleção de sistemas de medição de temperatura é feita considerando somente as incertezas individuais dos instrumentos. Tal procedimento simplista é inaceitável do ponto de vista metrológico. Em qualquer situação, e em especial na metrologia automatizada, é imprescindível a aplicação de análises com base em modelos equivalentes, que garantam o tratamento quantitativo de ruídos, interferências e principalmente da expressão do comportamento físico do sistema de medição ditada pelos parâmetros elétricos dos módulos constituidores, sua intra-relação e inter-relação com o meio. Para tal, é necessário o conhecimento das

características de todos os instrumentos e acessórios, bem como, de suas interligações e da forma como interagem com o meio e que retroagem com a grandeza a medir.

Neste capítulo é proposta, uma metodologia para seleção dos instrumentos para medição automatizada de temperatura. Ela possibilita análise e quantificação de incertezas incorporadas ao longo do sistema de medição, do transdutor ao conversor analógico/digital. Tal metodologia foi baseada na sistematização das informações contidas nos capítulos 2 e 3 presentes no trabalho. Adicionalmente, é apresentado um aplicativo computacional de apoio à especificação de instrumentos e acessórios e à determinação de incertezas de sistemas de medição automatizados de temperatura desenvolvido a partir da metodologia proposta.

5.1. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

A grande variedade de circunstâncias nas quais se deseja medir a temperatura e a diversidade de problemas e de particularidades inerentes, dificultam sobremaneira o estabelecimento de procedimento universal de seleção de sistemas de medição. Contudo, levando em consideração a diversidade de situações, procurou-se um alto grau de universalidade de aplicação e de modularidade de construção. A metodologia proposta pode ser estendida aumentando o universo de aplicações e, eventualmente, particularizada para simplificar a sua utilização em determinados tipos de situações cujas condições de contorno estejam bem definidas e repetidamente se apliquem, tal como em medição de temperatura de gases onde as fontes de erros a serem consideradas incluem: erro devido a velocidade dos gases, erro de

condução, erro de radiação e erro devido a variações rápidas da temperatura (por exemplo, em combustões e explosões).

A metodologia proposta é composta em 2 fases: caracterização do problema e configuração do processo de medição (fig. 5.1).

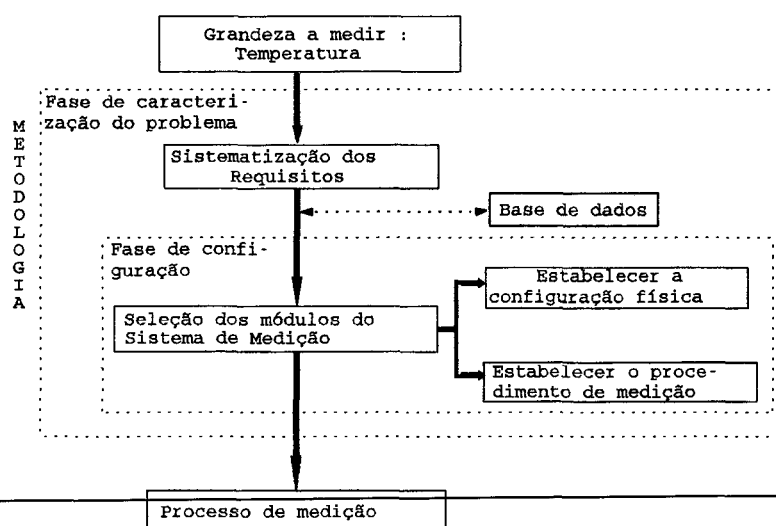


Figura 5.1. - Metodologia para análise e seleção de instrumentos de um processo de medição automatizado de temperatura.

A 1ª fase é responsável pela perfeita caracterização do problema (requisitos metrológicos e operacionais da aplicação), dando origem a critérios que servirão como referencial para seleção de instrumentos e análise do processo /12,20,22,38,54/.

A 2ª fase, de configuração, enfoca as questões relacionadas com o sistema de medição e está estruturada em subsistemas que estabelecem os módulos físicos, seu modelamento matemático, e a incerteza inerente ao sistema de medição.

5.1.1. Fase de Caracterização do Problema

A seleção do sistema de medição, obedece a critérios que dependem de cada particular situação. Primeiramente, é necessário estabelecer a grandeza a medir (GM) caracterizando-a por ponto de medição. O diagrama de bloco da figura 5.2 apresenta os fatores determinantes da fase de caracterização do problema.

a) Caracterização da grandeza a medir (GM)

O correto estabelecimento do processo de medição, incluindo a fixação do procedimento de medição, seleção e utilização do SM, requer pleno conhecimento da GM em cada ponto de medição. Como em um sistema automatizado de medição é freqüente o compartilhamento de módulos instrumentais, é necessário que a GM correspondente a cada ponto de medição esteja bem caracterizada. Tal caracterização, nesta proposta, foi baseada em características gerais e restrições específicas.

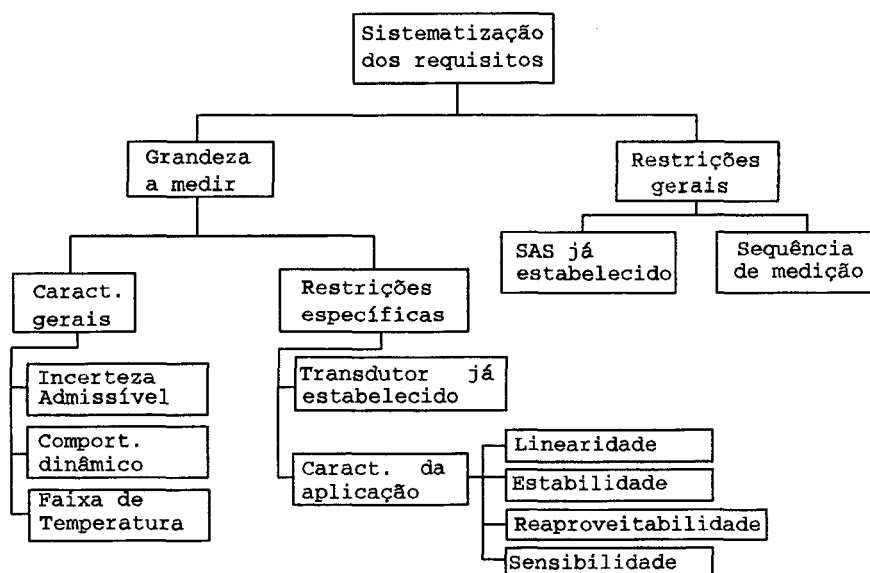


Figura 5.2. - Fatores determinantes da fase de caracterização.

As características gerais são aquelas que estão presentes na maioria dos processos, como:

- . faixa de temperatura de medição (limite inferior e superior);
- . incerteza de medição admissível do processo;
- . comportamento dinâmico da GM (estabelece o tempo de resposta mínimo necessário do sistema).

As restrições específicas levam em conta condições particulares da situação como: transdutor prefixado e características da aplicação.

Transdutor prefixado significa que o transdutor já foi previamente estabelecido em função de particularidades da aplicação ou quando, por outra razão, este já está definido pelo usuário. Tal ocorre, por exemplo, no caso da utilização da metodologia ora apresentada para análise da adequação de um sistema já configurado. No primeiro caso, é necessário definir o tipo e a incerteza de medição do transdutor. No segundo caso, é requerido o levantamento de suas características metrológicas. Os dados inerentes aos transdutores tipo termopar, contemplados pelo modelo, são:

- . tipo;
- . configuração (junta exposta, aterrada e não aterrada);
- . característico de resposta;
- . resistência do transdutor;
- . resistência dos fios ou cabos de compensação/extensão;
- . variação da resistência dos fios ou cabos de compensação/extensão com a temperatura ambiente;
- . característica dinâmica (na forma de tempo de resposta, constante de tempo ou frequência de corte);
- . incerteza de medição ou curva de erros do transdutor e fios.

Para sensores resistivos, os dados contemplados pelo modelo são:

- . tipo;
- . característico de resposta;
- . resistência dos fios de ligação;
- . variação da resistência dos fios de ligação com a temperatura ambiente;
- . configuração dos fios (2, 3 e 4 fios);
- . coeficiente de auto-aquecimento;
- . tempo de resposta;
- . incerteza de medição ou curva de erros do transdutor.

Quando não conhecidas a incerteza de medição ou a curva de erros de termopares e termorresistores de platina ($R_0=100\ \Omega$) e níquel, é recomendado o usuário adotar limites de erro estabelecidos pelas normas mais freqüentemente utilizadas para tais transdutores (ASTM E 230-77 e DIN 43760, respectivamente).

Como característica da aplicação, os fatores mais importantes estão relacionados com linearidade, estabilidade, sensibilidade e reaproveitabilidade. O não reaproveitamento é fator determinante em aplicações como por exemplo em ensaio de refrigeradores, segundo NBR 7253 e 7255, onde há necessidade de facilidade de fixação e de que, em muitos pontos de medição, sejam os transdutores descartados após a aplicação, impõem a utilização de termopares.

b) Restrições gerais

Como restrições gerais tem-se: sistema de aquisição de sinais (SAS) já estabelecido e seqüência de medição.

b.1) SAS já estabelecido

Para efeito de análise da cadeia de medição, o sistema de aquisição de sinais (SAS) pode ser entendido como constituído pelos módulos de multiplexação e unidade de condicionamento de sinal, até a conversão A/D. Depois da conversão as fontes de erros têm influência mínima sobre a incerteza total, tendo sido excluídas da análise pela metodologia proposta. É importante que sejam conhecidos não só os valores típicos dos parâmetros específicos de cada módulo, como também suas variações sob as condições de utilização. As principais especificações técnicas relativas aos módulos de multiplexação são:

- . resistência de contato fechado da chave;
- . variação da resistência de contato fechado da chave com a temperatura;
- . variação da resistência de contato fechado da chave com o tempo que permanecem chaveados;
- . variação da resistência de contato fechado da chave entre chaveamentos;
- . força eletromotriz térmica diferencial da chave (e suas variações com a temperatura e tempo de chaveamento);
- . resistência entre o *high* e *low*;
- . capacitância entre o *high* e *low*;
- . resistência entre o *low* e *guard*;
- . capacitância entre o *low* e *guard*;
- . corrente de fuga;
- . variação da corrente de fuga com a temperatura;
- . número de canais isolados por bloco;
- . máxima tensão de modo comum;
- . incerteza da junção de referência (somente para termopares);

- . gradiente de temperatura entre os bornes de ligação;
- . vida útil das chaves.

Para o módulo condicionador de sinal, as principais especificações técnicas, são:

- . tensão de *offset*;
- . corrente de *offset*;
- . *drift* de *offset* vs. temperatura;
- . *drift* de *offset* vs. tensão de alimentação;
- . *drift* de *offset* vs. tempo (devido ao envelhecimento dos componentes sob utilização);
- . *drift* do ganho vs. temperatura;
- . corrente e tensão de ruído;
- . impedância de entrada;
- . erro agrupado (inclui o erro do ganho, erro de linearidade e de quantização) /55/;
- . tempo de conversão total ⁽¹⁾ (inclui o tempo de chaveamento, tempo de aquisição, tempo de conversão A/D, *settling time*, etc.) /44/;
- . corrente de excitação;
- . *drift* da corrente de excitação vs. temperatura;
- . resistência de saída da fonte de corrente (somente para sensores resistivos);
- . razão de rejeição de modo comum (CMRR).
- . razão de rejeição de modo diferencial (NMRR).

Obs: (1) O tempo de conversão total é adotado desta forma, em função de, em medição de temperatura não ser crítico. Em outras aplicações poderia exigir otimização individual.

b.2) Sequência de medição

A sequência de medição impõe restrições dinâmicas ao sistema e é mais significativa quando em um mesmo multiplexador há necessidade de se passar sinais de mais alta para mais baixa tensão, devido ao *crosstalk* estático. Também, podem estar impostas restrições pelo aplicativo.

5.1.2 Fase de Configuração

A figura 5.3 apresenta a estrutura lógica da fase de configuração. Após a fase de caracterização do problema, onde são estabelecidos todos requisitos, é necessário se conhecer todos os instrumentos disponíveis para a seleção do SM. Uma maneira de selecionar tais instrumentos é por meio de uma base de dados.

A base de dados deve ser constituída de 3 grupos de informações:

- . características metrológicas e operacionais dos transdutores, tais como: faixa de temperatura de operação, sensibilidade, limite de erros, tempo de resposta, linearidade, estabilidade;
- . principais características metrológicas (valores típicos) da unidade de condicionamento de sinal e módulo de multiplexação de alguns dos atuais maiores fabricantes;
- . modelos elétricos equivalentes e equacionamento das configurações mais usuais na implementação de sistemas de medição automatizados.

O estabelecimento do procedimento é definido por meio do cálculo do tempo mínimo necessário de permanência das chaves para efetivação da aquisição, considerando o tempo de resposta do transdutor e o tempo de conversão total do condicionador de sinal.

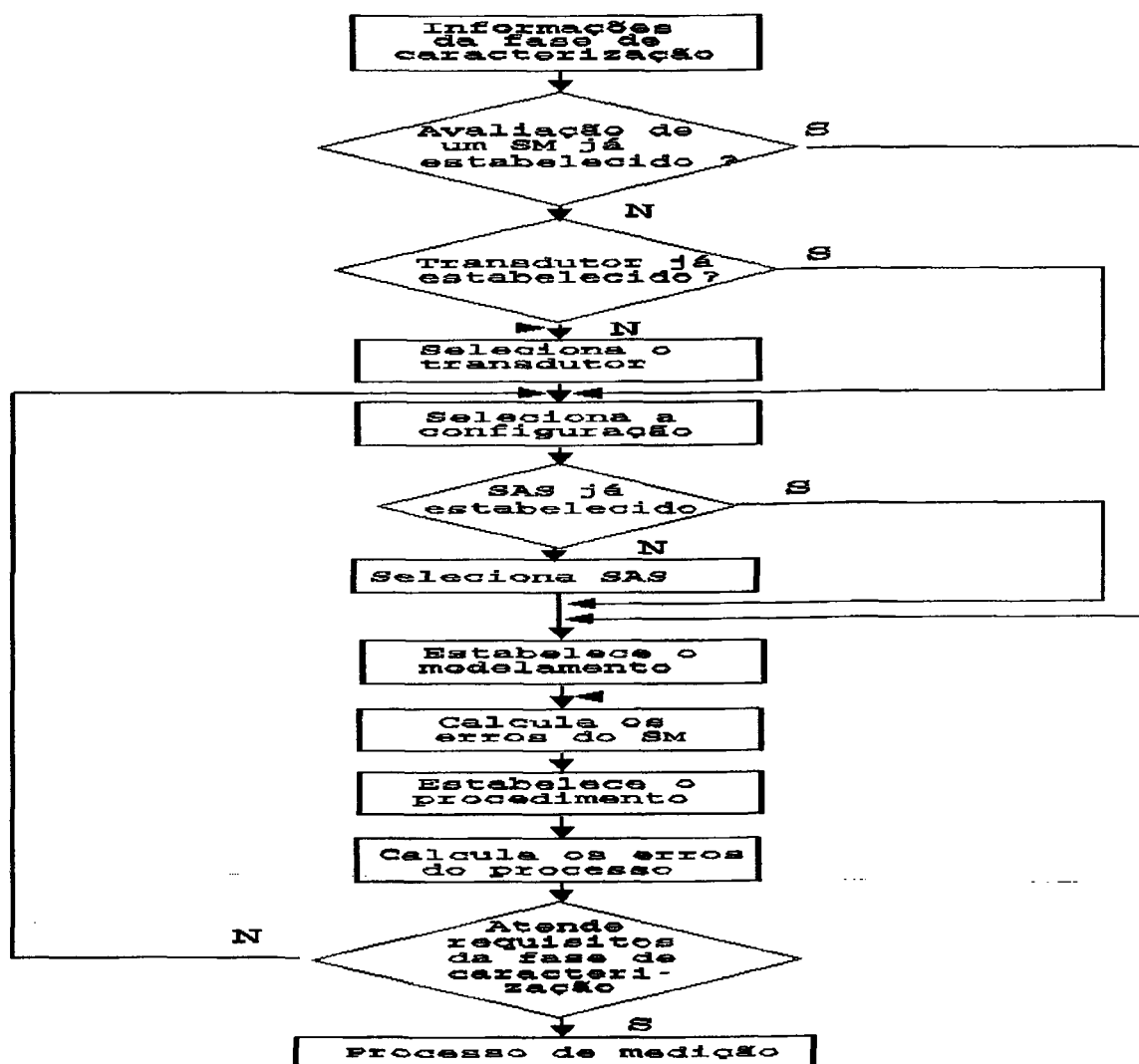


Figura 5.3. - Estrutura lógica da fase de configuração.

A exatidão dos instrumentos, expressa ao longo das suas faixas nominais pelas componentes sistemáticas do erro e respectivas dispersões, ou simplesmente pela incerteza de medição do instrumento, são tratadas no equacionamento dos erros em conjunto com os dados do modelo elétrico equivalente, possibilitando o cálculo da incerteza global resultante.

A escolha do sistema de medição indicado pela metodologia, deve ser referendada pelo usuário considerando, as condições de contorno adicionais, existentes em situações particulares, tais como:

- . natureza do meio imediatamente ao redor do meio sob medição (por exemplo: fluidos corrosivos, fluidos eletricamente condutivos, alta pressão, temperatura elevada e fatores similares, podem impor restrições ao transdutor selecionado);
- . condições ambientais adicionais à temperatura ambiente (ex.: vibrações, umidade, campos elétricos e magnéticos);
- . instalação (usinabilidade, fragilidade, condutividade elétrica, soldabilidade e condutividade térmica são propriedades do material utilizado para proteger o transdutor que devem ser consideradas, pois podem afetar a durabilidade da instalação e a qualidade dos resultados);
- . custo.

5.2. APLICATIVO COMPUTACIONAL (SISTEMA DE SELEÇÃO)

Na seleção de um sistema de medição automatizado de temperatura para cada particular situação, a experiência de especialistas em termometria é fundamental. Devido à grande diversidade de parâmetros envolvidos e condições de contorno particulares, um sistema computacional pode facilitar sobremaneira a aplicação da metodologia proposta.

A título de exemplo foi desenvolvido um programa, realizado em linguagem Pascal, que permite a seleção de instrumentos e acessórios e a determinação de incertezas de sistemas de medição de temperatura com transdutores elétricos tipos termopar, termorresistor e termistor, considerando as fontes de erros comuns aos sistemas de

medição elétricos e específicas da automação, sejam em aplicações industriais ou laboratoriais. Programas como este poderão ser adotados, de forma associada a programas de calibração de instrumentos, em sistemas de garantia da qualidade, auxiliando a otimizar os procedimentos de calibração, adequar o tamanho dos intervalos de calibração e assegurando resultados de medições com incertezas apresentadas de forma confiável.

A configuração mínima necessária para a execução do protótipo desenvolvido é a seguinte:

- . microcomputador IBM PC/XT/AT;
- . sistema operacional MS-DOS ou superior;
- . vídeo monocromático ou colorido;
- . placa gráfica CGA ou EGA.

5.2.1. Estrutura do Aplicativo Computacional

O sistema de seleção é constituído de uma base de dados, e dos módulos "fase de caracterização do problema" e "fase de configuração". Na base de dados foram armazenadas as seguintes informações:

- . características metrológicas e operacionais dos transdutores tipos termopar (K, J, T, E, R e S), termorresistor de níquel e platina ($R_0=100\ \Omega$) e termistor ($R_{25^\circ C}$ igual a 2252, 3000, 5000, 10000 e 30000 Ω);
- . valores típicos das principais características metrológicas do módulo de multiplexação (fig. 2.29) e condicionamento de sinal (fig. 3.1);

. modelos elétricos equivalentes na aquisição automatizada de dados com termopares e sensores resistivos (configuração a 2 e 4 fios), e respectivos equacionamentos.

Como resultado da freqüente, e crescente utilização, de ohmímetros em sistemas automatizados de temperatura para sensores resistivos, a configuração a 3 fios não foi implementada no protótipo.

Obs.: Explicações detalhadas de como trabalhar com o sistema de seleção estão presentes no manual do usuário /107/.

a) Módulo fase de caracterização do problema

Permite a operação de inclusão de dados relativos à grandeza a medir e aos instrumentos já estabelecidos pelo usuário, conforme descrito no item 5.1.1 (fig. 5.4). Cabe ao usuário, fornecer corretamente todos os dados necessários (valores típicos) para o cálculo dos erros do sistema de medição.

Fase de Caracterização
<ul style="list-style-type: none">. Grandeza a medir. Restrições gerais. Calcular
Enter-Selecionar F1-Ajuda Esc-Sair

Figura 5.4.- Opções da fase de caracterização.

A opção calcular determina a execução do programa.

A figura 5.5 apresenta um dos parâmetros de entrada dentro da opção grandeza a medir da fase de caracterização.

Fase de Caracterização
. Grandeza a medir
Restrições específicas
. transdutor já estabelecido . características da aplicação
Enter-Selecionar F1-Ajuda Esc-Sair

Figura 5.5.- Opções dentro da caracterização da grandeza a medir.

b) Módulo fase de configuração

Este módulo permite a seleção e avaliação do sistema de medição para uma dada tarefa de medição. Através deste módulo executam-se as seguintes tarefas:

- . seleciona o sistema de medição (transdutor, configuração e sistema de aquisição de sinais);
- . seleciona o transdutor e configuração;
- . seleciona o sistema de aquisição de sinais (SAS);
- . avalia o sistema de medição já estabelecido pelo usuário.

A figura 5.6 apresenta a tela de inicialização do módulo fase de configuração.

Fase de Configuração
<ul style="list-style-type: none"> . Seleciona o SM . Seleciona o Transdutor . Seleciona o SAS . Avalia o SM
Enter-Selecionar F1-Ajuda Esc-Sair

Figura 5.6.- Opções da fase de configuração.

A figura 5.7 apresenta, a título de exemplo, os parâmetros de entrada do módulo de multiplexação para avaliação de um sistema já implementado pelo usuário.

Multiplexador
<ul style="list-style-type: none"> 1- resistência de contato da chave (Ω) 2- f.e.m. térmica diferencial da chave (μV) 3- resistência entre high e low (Ω) 4- capacitância entre high e low (F) 5- corrente de fuga (nA) 6- n° de canais isolados por bloco 7- im. junção de referência ($^{\circ}C$)
Enter-Selecionar F1-Ajuda Esc-Sair

Figura 5.7.- Parâmetros do módulo de multiplexação.

Através da técnica de propagação de erros /108/, é determinado a parcela da incerteza global do sistema de medição, devida às incertezas individuais dos módulos constituidores do sistema de medição.

A figura 5.8 mostra a estrutura lógica deste módulo.

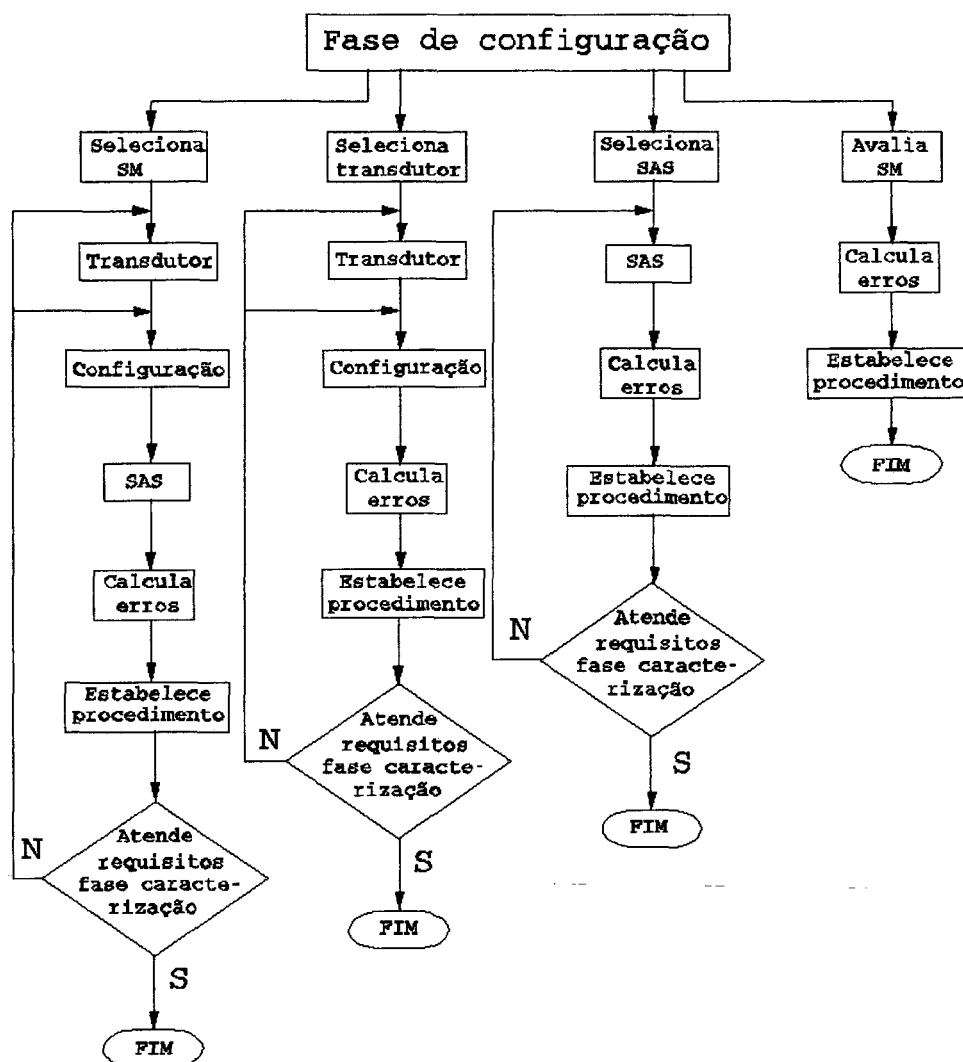


Figura 5.8. - Estrutura lógica da fase de configuração.

5.2.2. Teste e Avaliação Geral do Sistema de Seleção (protótipo)

O protótipo desenvolvido foi submetido à simulação de uso para diferentes aplicações: ensaios de refrigeradores, bancada de ensaios de motores a combustão interna, fornos de tratamentos térmicos e avaliação de um sistema de medição de temperatura em pistões automotivos, já configurado com transdutores tipo termopar. A análise

dos resultados obtidos trouxe conclusões importantes para o aprimoramento da qualidade do protótipo, como:

- . o sistema não contempla a análise individual e nem a quantificação dos erros inerentes à retroação do transdutor sob a grandeza a medir e nem dos decorrentes de campos elétricos e magnéticos do meio. Contudo, desde que a magnitude de tais erros adicionais seja conhecida, o sistema permite a introdução de tais erros por meio do parâmetro condições de contorno adicionais.

O protótipo desenvolvido foi testado em todas as suas possibilidades sem que fossem identificadas falhas de operação. Contudo, uma avaliação de sua eficiência requer que o mesmo seja testado por diversos usuários, para diferentes aplicações.

O protótipo apresentou facilidade de utilização, não exigindo do seu usuário maior especialização em termometria, instrumentação elétrica ou automação. Adicionalmente, apresenta como características: facilidade de interação devido ao uso de telas (o protótipo foi desenvolvido pelo uso da ferramenta TELAS), alta portabilidade e modularidade de construção (facilitando eventuais manutenções e implementação de módulos adicionais). Explicações simplificadas de como trabalhar com o aplicativo e a terminologia empregada estão presentes numa opção ajuda, facilitando sobremaneira a sua utilização.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há tendência à exigência de aumento da confiabilidade e redução de incertezas de medição nos mais diversos campos do conhecimento onde é empregada a termometria automatizada. Para tal, é necessário considerar o processo de medição como um todo, pois sem resultados comprovadamente confiáveis fica comprometida a qualidade das medições.

Dentro do presente trabalho, desenvolveu-se metodologias que fornecem subsídios para garantir a qualidade metrológica nas medições automatizadas de temperatura com transdutores dos tipos termopar, termorresistor e termistor. Embora tenham sido desenvolvidas para aplicação na termometria automatizada, os resultados dos estudos podem, em grande parte, ser aplicados na termometria convencional. O conhecimento proporcionado permitiu que se chegasse às conclusões a seguir relacionadas, a respeito do modelo elétrico equivalente; mecanismos de instabilidade dos transdutores elétricos; metodologia de ajuste de intervalos de calibração; e, seleção dos módulos físicos e lógicos de processos automatizados na termometria.

a) Modelo elétrico equivalente:

- . a incerteza do resultado de uma medição, resultante das fontes de erros associadas à termometria com transdutores elétricos, é

específica de cada sistema e situação particular. É necessário, portanto, para cada processo de medição analisar sistematicamente cada fonte de erro, e em conjunto com as características estáticas e dinâmicas dos instrumentos, estabelecer o seu grau de significância;

- . a análise do modelo elétrico equivalente da cadeia de medição é de grande valia e até mesmo imprescindível para a obtenção da incerteza do sistema de medição;
- . os parâmetros mais significativos do modelo elétrico equivalente da cadeia de medição automatizada de temperatura com transdutores elétricos, muito dos quais não são fornecidos pelos fabricantes, estão relacionados no item 3.4. É importante que sejam conhecidos não só os valores típicos de tais parâmetros como também suas incertezas e variações frente às condições de operação;
- . a corrente de fuga combinada e a de *offset*, quando da ordem de nanoampère, valor na prática muitas vezes encontrado, são parâmetros fortemente influentes, principalmente para termopares com baixa tensão termoelétrica, termorresistores e termistores em temperaturas abaixo de 0 °C;
- . no caso de termorresistores e em especial de termistores, é recomendável a utilização de módulos de multiplexação e condicionamento de sinal com alta resistência de entrada ($>G\Omega$), a fim de minimizar o efeito de retroação;
- . as tensões parasitas no circuito de medição em série com tensão diferencial a ser medida, têm importância principalmente para termopares e termorresistores. Estas podem gerar erros de ordem considerável quando são utilizados multiplexadores semicondutores;
- . a termometria com termorresistor é usual nas medições com baixo nível de incerteza, sendo para este caso recomendado que a corrente fornecida pela fonte de corrente seja da ordem de 1 mA ou maior. Se

muito baixa a medição será fortemente influenciada pela corrente de fuga, com conseqüente aumento do erro. Para se garantir que o efeito do auto-aquecimento do sensor não comprometa os resultados, a alimentação deve ser mantida o mínimo tempo necessário para medição;

b) Mecanismos de instabilidade de transdutores elétricos:

- . a instabilidade dos transdutores tipo termopar é mais crítica do que dos tipos termorresistor e termistor, sendo que são principalmente causadas por variações na composição química dos termoelementos submetidos a um gradiente térmico e que aumenta exponencialmente com a temperatura;
- . o uso de materiais do tubo de proteção com composição química semelhante à dos termoelementos melhora muito a estabilidade do termopar;
- . uma vez estabelecido o comprimento de imersão no meio sob medição, em uma dada aplicação, em sua calibração subsequente o termopar deve ser inserido com similar comprimento de imersão, para se poder identificar e controlar as fontes de instabilidades concernentes;
- . o aumento do tamanho de grão, bem como impurezas presentes no tubo de proteção são as principais fontes de instabilidade em termorresistores de platina; entretanto, os desvios resultantes do aumento do tamanho do grão podem ser reduzidos se o sensor é adequadamente recozido;
- . termorresistores de platina tipo filme, são mais sensíveis aos choques térmicos (aquecimento e resfriamento rápidos) dos que os tipo convencional (fio enrolado), devido ao seu pequeno tamanho, podendo gerar erros mais significativos;
- . o desvio termométrico em transdutores tipo termistor, é devido principalmente à estrutura cristalógrafica do material

semicondutor; que é função das condições de sinterização e taxas de resfriamento;

c) Metodologia de ajuste de intervalos de calibração:

- . a seleção do critério de monitoração é principalmente dependente dos mecanismos de instabilidade de cada transdutor, além do limite de erro tolerado e da disponibilidade do transdutor;
- . a definição da decisão a respeito do novo intervalo de calibração, é principalmente, dependente do pessoal envolvido no processo. Essa subjetividade na tomada de decisão, pode ser reduzida pelo uso de modelos matemáticos. Entretanto, cabe salientar, a limitação prática de aplicação do modelo matemático; frente à dificuldade de estabelecimento de parâmetros de controle;
- . a metodologia proposta estabelece critérios para o ajuste do intervalo de calibração e pode ser facilmente aplicada em qualquer tipo de processo, seja em laboratórios ou indústrias.

d) Metodologia para seleção dos módulos físicos e lógicos de processos automatizados na termometria:

- . a metodologia de seleção apresenta de forma sistematizada os fatores relevantes na seleção de um sistema de medição de temperatura automatizado, a fim de selecionar a melhor configuração para uma dada aplicação;
- . os parâmetros apresentados na fase de caracterização do problema, representam os requisitos necessários para a maioria das aplicações. Contudo, seu comportamento sob as mais diferentes aplicações deveria ser observado, para análise da efetividade da metodologia proposta;
- . a modelagem aplicada permite uma sistematização da análise dos erros associados ao processo, o que proporciona ganhos na

confiabilidade da análise, uma vez que, são obtidos resultados quantitativos do grau de significância de cada um dos parâmetros envolvidos;

- . para que se tire o máximo proveito do aplicativo desenvolvido a partir da metodologia é fundamental que os fabricantes melhorem o nível de informações acerca das características dos instrumentos e em especial dos multiplexadores de sinais de medição e dos condicionadores de sinais.

As contribuições técnico-científicas alcançadas no transcorrer do trabalho, estão a seguir:

- . foram apresentadas informações de caráter prático, acerca das fontes de erros possibilitando análise mais detalhada e segura acerca do comportamento metrológico dos sistemas empregados na termometria automatizada, sem similar identificado;
- . foi proposto um modelo para análise de erros, descrito no capítulo 3, para garantir a obtenção de resultados com incertezas asseguradas. O modelo se baseia no circuito elétrico equivalente de toda a cadeia de medição, do transdutor ao conversor A/D, identificando e quantificando fontes de erros inerentes;
- . foram mostrados os aspectos relevantes da instabilidade termométrica dos transdutores elétricos de temperatura para se estimar o intervalo de calibração inicial de tais transdutores, além de apresentar uma metodologia de auxílio à determinação dos intervalos subseqüentes;
- . foi desenvolvida uma metodologia e um protótipo de um aplicativo computacional de apoio à seleção de sistemas automatizados na termometria para auxiliar na especificação da mais adequada cadeia de medição e determinar a concernente incerteza de medição;

Como sugestão para a continuidade do trabalho, tem-se:

- . aplicação da metodologia de ajuste de intervalos de calibração para conjunto de transdutores em diferentes aplicações, de modo que se tenha conjunto de dados que permita identificar os mecanismos de instabilidade e formas de previsão;
- . criação de novos módulos associáveis ao protótipo computacional desenvolvido, como por exemplo para aquisição e ajuste do intervalo de calibração;
- . fazer uma análise quantitativa e qualitativa das fontes de erros relacionadas com a aplicação, com a finalidade de se obter uma análise realizada em cima de um grande grupo de aplicações tais como; corpos em movimento, líquidos, gases em alta temperatura, reatores nucleares;
- . fazer um estudo detalhado das fontes de erros associadas às calibrações, seja através de pontos fixos ou de comparação com sistemas de medição padrão, identificando limites práticos de compensação de erros nas aplicações;
- . fazer um estudo aprofundado da termometria criogênica, estabelecendo procedimentos de calibração, materiais e técnicas usuais de medição;
- . analisar a aplicação da inteligência artificial na seleção de sistemas de medição e no estabelecimento de intervalos de calibração;
- . particularizar as metodologias propostas para aplicações específicas, com intuito de simplificar ainda mais a sua utilização e extrair o máximo de resultados em termos quantitativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ KuritnyK, I.P NEW COMECON STANDARDS FOR TEMPERATURE FACILITIS
Meas. Techniques , Plenum Publishing Corp., 64-69, janeiro, 1990.
- /2/ INMETRO VOCABULÁRIO DE METROLOGIA LEGAL E VOCABULÁRIO DE TERMOS FUNDAMENTAIS E GERAIS DE METROLOGIA
Portaria 102, Duque de Caxias, junho, 1988.
- /3/ ABNT TERMOPAR - TERMINOLOGIA
TB - 396, Associação Brasileira de Normas Técnicas, outubro, 1991.
- /4/ ASTM STANDARD DEFINITIONS OF TERMS RELATING TO TEMPERATURE MEASUREMENT
ASTM E 344-79, Philadelphia, 1979.
- /5/ BSI TERMS USED IN METROLOGY
BS 5233:1986, British Standards Institution, Inglaterra, 1986.
- /6/ Metrologia THE INTERNATIONAL TEMPERATURE SCALE OF 1990 ITS-90
Springer Verlag
- /7/ Pollock, D.D. THE THEORY AND PROPERTIES OF THERMOCOUPLE ELEMENTS
STP 492, ASTM, New York, 1971, ISBN 0-8031-0074-4.
- /8/ ASTM MANUAL ON THE USE OF THERMOCOUPLES IN TEMPERATURE
STP 470 A, ASTM, Philadelphia, 1974.
- /9/ Hewlett-Packardt PRACTICAL TEMPERATURE MEASUREMENTS
Aplication note 290, 1980.
- /10/ NIST THERMOCOUPLE REFERENCE TABLES
Monograph 125, Omega Eng, USA, 1974.
- /11/ BSI CODE FOR TEMPERATURE MEASUREMENT
British Standards Institution, BS 1041, Parte 4, 1-37, Inglaterra, 1966.
- /12/ Backer, H.D. TEMPERATURE MEASUREMENT IN
Ryder, E.A. ENGINEERING
Baker, N.K. Omega Engineering, Vol. 1, Stamford, 1975.

- /13/ Paletta, F.C. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA (SENSORES
CONVENCIONAIS, SELEÇÃO, APLICAÇÃO E
AFERIÇÃO)
Thermologic, São Paulo, 1991.
- /14/ Borchardt, I.G. TERMOMETRIA TERMOELÉTRICA -
Gomes, A.F. TERMOPARES
Grafisa, Porto Alegre, 1979.
- /15/ Ecil PIROMETRIA - CATÁLOGO GERAL.
Ecil, São Paulo, 1990.
- /16/ Omega THE TEMPERATURE HANDBOOK
Omega Engineering, USA, 1989.
- /17/ Doebelin, E.O. MEASUREMENT SYSTEMS
McGraw-Hill Publishing Company, USA,
1990, ISBN 0-07-017338-9.
- /18/ Analog Devices DATA ACQUISITION DATABOOK 1984
Integrated Circuits, Analog Devices,
Vol. I, 1984.
- /19/ National Semiconductor DATA ACQUISITION LINEAR DEVICES
Nacional Semiconductor, USA, 1990.
- /20/ Baker, H.D. TEMPERATURE MEASUREMENT IN
Ryder, E.A. ENGINEERING
Baker, N.N. Omega Engineering, Vol. 2, Stamford,
1975.
- /21/ Abilovm, G.S. MEASURING LOW TEMPERATURES IN STRONG
Razhba, I.A. MAGNETIC FIELDS WITH RESISTANCE
Verfikimeev, S.F. THERMOMETERS BASED ON A RHODIUM-IRON
Kytin, G.A. ALLOY
Meas. Techniques , Plenum Publishing
Corp., 55-57, 1990.
- /22/ Lipták, B.G. INSTRUMENT ENGINEERS HANDBOOK
Venczel, K. Cilton Book Company, Pensylvania, 1982,
ISBN 0-8019-6971-9.
- /23/ Susol, P.I. MAKING MICROCIRCUIT-STYLE THIN-FILM
Nabirovich, I.D. RESISTANCE THERMOMETERS
Lakh, V.I. Meas. Techniques, Plenum Publishing
Boris, Y.V. Corp., 57-59, 1990.
- /24/ BSI INDUSTRIAL PLATINUM RESISTANCE
THERMOMETER SENSORS
British Standards Institution
BS 1904, 1984, IEC 751, 1983.

- /25/ ECIL 1º SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E CALIBRAÇÃO Ecil, São Paulo, 1989.
- /26/ Carr, K.R. AN EVALUATION OF INDUSTRIAL PLATINUM RESISTANCE THERMOMETERS Temperature, It's Measurement and Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 4, parte 2, 971-982, New York, 1971.
- /27/ Curtis, D.J. PLATINUM RESISTANCE INTERPOLATION STANDARDS Temperature, It's Measurement and Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 4, parte 2, 951-961, New York, 1972.
- /28/ Evans, J.P. HIGH TEMPERATURE PLATINUM RESISTANCE THERMOMETRY Temperature, It's Measurement and Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 4, parte 2, 899-995, New York, 1972.
- /29/ Eriksson, L.J.
Keuther, F.W. A LINEAR RESISTANCE THERMOMETERS Temperature, It's Measurement and Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 4, parte 2, 899-906, New York, 1972.
- /30/ Dutt, M. PRACTICAL APPLICATIONS OF PLATINUM RESISTANCE SENSORS Temperature, It's Measurement and Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 4, parte 2, 1013-1019, New York, 1972.
- /31/ BSI TEMPERATURE MEASUREMENT. GUIDE TO SELECTION AND USE OF INDUSTRIAL RESISTANCE THERMOMETERS BS 1041, British Standards Institution, parte 3, 1-14, 1989.
- /32/ DIN INDUSTRIELLE PLATIN - WIDERSTANDSTHERMOMETER UND PLATIN - MEßWIDERSTÄNDE DIN IEC 751- 43 760, Deutsche Norm, 1-15, outubro 1985.
- /33/ PTB PRINCIPLES OF ELECTRIC TEMPERATURE MEASUREMENT PTB-E-13e, Physikalisch Technische Bundesanstalt, julho 1981, ISBN 0341-6674.

- /34/ Alloca, J.A.
Stuart, A. TRANSDUCERS THEORY AND APLICATIONS
Reston Publishing Company Inc., 1984,
ISBN 0-8359-7796-X.
- /35/ Logvinenko
Rossoshanokil, O.A.
Opriahchwnko LOW TEMPERATURE SEMICONDUCTOR
RESISTANCE THERMOMETER
Meas. Techniques, Plenum Publishing
Corp., 1110-1112, 1989.
- /36/ Zurbchen, J.M.
Case, D.A. AGING PHENOMENA IN NICKEL-MANGANESE
OXIDE THERMISTORS
Temperature, It's Measurement and
Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 4,
parte 2, New York, 1982.
- /37/ Haziw, S.N.
Agarunov, M.J. PRECISION MEASUREMENTS OF TEMPERATURE
DIFFERENCES WITH THERMISTORS BY A
SIMPLE TECHNIQUE
Temperature, It's Measurement and
Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 4,
parte 2, 1065-1069, New York, 1972.
- /38/ Tristley, H.L. TRANSDUCERS IN MECHANICAL AND
ELECTRONIC DESIGN
Marcel Dekker Inc., 1986, ISBN 0-8247-
7598-8.
- /39/ Slomovitz, D. THE TEMPERATURE/RESISTANCE CURVE
OF NTC THERMISTORS
Test & Measurement World, 73-77, maio
1987.
- /40/ Hoge, J.H. COMPARASION OF CIRCUITS FOR LINEARIZING
THE TEMPERATURE INDICATIONS OF
THERMISTORS
Rev. Sci.Instrum., American Institute
of Physics, Vol. 50, n° 3, 316-320,
1979.
- /41/ Sawada, T.
Nishiwaki, N. RESPONSE OF A THERMOCUPLE TO
TRANSIENT TEMPERATURE CHANGES IN A
METAL TO WHICH IT IS ATTACHED
Mech. Sci., Vol 33, n° 7, 551-561,
Great Britain, 1991.
- /42/ Knima, S.L.
Nechai, A.A.
Semenov, A.A. ALTERNATING CURRENT BRIGDES IN
THERMOMETRY
Meas. Techniques, Plenum Publishing
Corp., 769-771, 1989.

- /43/ Jones, B.E. INSTRUMENTATION, MEASUREMENT AND FEEDBACK
McGraw-Hill Book Company (UK) Limited,
Great Britain, 1977, ISBN 0-084069-5.
- /44/ Burr-Brown THE HANDBOOK OF PERSONAL COMPUTER INSTRUMENTATION
Data Acquisition, Test, Measurement and Control. Burr-Brown Corporation/Intelligent Inst.Inc., USA 1990.
- /45/ Camarano, D.M. GARANTIA DA QUALIDADE METROLÓGICA NAS Flesch, C.A. MEDIÇÕES AUTOMATIZADAS DE TEMPERATURAS COM TRANSDUTORES ELÉTRICOS
I Congresso Iberoamericano de Inq Mec., Madrid, 1993.
- /46/ Keithley LOW LEVEL MEASUREMENTS
Keithley Instruments Inc., Cleveland USA, 1984.
- /47/ Keithley TEST & MEASUREMENT
Keithley Instruments Inc., Cleveland USA, 1991.
- /48/ Keithley SWITCHING HANDBOOK
Keithley Instruments Inc., USA, 198
- /49/ Hewlett-Packard HP 3458A MULTIMETER - OPERATING PROGRAMING AND CONFIGURATION MANUAL
Hewlett-Packard Company, USA, 1988
- /50/ Hewlett-Packard 75000 FAMILY OF VXI PRODUCTS
Hewlett-Packard Company, USA, 1990
- /51/ Hewlett-Packard 3852S DATA ACQUISITION AND CONTROL SYSTEM
Hewlett-Packard Company, USA, 198
- /52/ Hewlett-Packard THE FUNDAMENTALS OF DATA ACQUISITION
Hewlett-Packard Company, USA, 199
- /53/ Analog Devices TRANSDUCER INTERFACING HANDBOOK
Analog Devices, USA, 1980, ISE 1916550-05-2.
- /54/ Dally, H.W. INSTRUMENTATION FOR ENGINEERING
Riley, W.F. MEASUREMENTS
McConnell, K.G. John Willey & Sons Inc., 1984,
0-471-045-48-9.

- /55/ Analog Devices ANALOG DIGITAL CONVERSION HANDBOOK
Analog Devices, USA, 1986, ISBN 0-13-032848-0 025.
- /56/ Keithley DATA ACQUISITION & CONTROL
Keithley Inst. Inc., USA, 1990.
- /57/ National Inst. IEEE 488 AND VXIBUS CONTROL, DATA
ACQUISITION AND ANALYSIS
National Inst. Inc., 1993.
- /58/ Analog Devices LINEAR PRODUCTS DATABOOK
Analog Devices Inc., 1990.
- /59/ Flesch, C.A. CIRCUITOS ELETRÔNICOS BÁSICOS
Apostila do curso de pós-graduação em
Eng. Mec. UFSC, Florianópolis, 1992.
- /60/ Putten, A.F.P. ELECTRONIC MEASUREMENTS SYSTEMS
Prentice Hall International Ltd, Great
Britain, 1988, ISBN 0-12-251885-6.
- /61/ National Semic. LINEAR APPLICATIONS
National Semiconductor Corp., USA,
1980.
- /62/ Sliwczunski, B. AN AUTOMATIC CORRECTION OF TIME
DRIFT ERROR IN MEASUREMENT SYSTEMS
Meas. Sci. Technol., Iop Publishing
Ltd., Vol. 3, 569-573, 1992.
- /63/ Giozza, W.F.
Moura, J.A. REDES LOCAIS DE COMPUTADORES
McGraw-Hill, 1986, ISBN 0-07-450141-0.
- /64/ Hewlett-Packard NOISE FIGURA MEASUREMENT ACCURACY
Application Note 57-2, USA, 1988.
- /65/ Hewlett-Packard FUNDAMENTALS OF RF AND MICROWAVE NOISE
FIGURE MEASUREMENTS
Application Note 57-1, USA, 1983.
- /66/ White, D.R.
Clare, J.F. NOISE IN MEASUREMENTS OBTAINED BY
SAMPLING
Meas. Sci. Technol., Iop. Publishing
Ltd., 1-16, 1992.
- /67/ Mardiguian, M. HOW TO CONTROL ELECTRICAL NOISE
Interference Control Technologies Inc.,
USA, 1983, ISBN 0-932263-22-4.
- /68/ Denny, H.W. GROUNDING FOR THE CONTROL OF EMI
Interference Control Technologies Inc.,
USA, 1989, ISBN 0-932263-17-8.

- /69/ Ramadan, B. HIGH ACCURACY, HIGH RESOLUTION AUTOMATED VOLTAGE DATA ACQUISITION SYSTEM INCLUDING MULTIPLEXER AND CURRENT SUPPLY
Meas. Sci. Technol. 1, Iop Publishing Ltd., 1017-1023, Great Brain, 1990.
- /70/ Garrett, P.H. ANALOG I/O DESIGN ACQUISITION: CONVERSION:RECOVERY
Reston Publishing Company, Inc., Virginia, 1981, ISBN 0-8358-0208-0.
- /71/ Camarano, D.M. Flesch, C.A. ERROS NA MULTIPLEXAÇÃO AUTOMATIZADA DE TEMPERATURA COM TRANSDUTORES DO TIPO TERMOPAR, TERMORRESISTOR E TERMISTOR
V Congreso Nac. de Ing. Mecánica, Chile, 1992.
- /72/ Hewlett-Packard PRACTICAL TEST SYSTEM SIGNAL SWITCHING
Application note 328-1, HP, USA, 1983.
- /73/ Taylor, J.L. FUNDAMENTALS OF MEASUREMENT ERROR
Neft Inst. Corp., USA, 1988.
- /74/ Moffat, R.J. THE GRADIENT APPROACH TO THERMOCOUPLE CIRCUITRY
Experimental Techniques, 23-25, abril 1984.
- /75/ Anderson, R.L. Mossam, C.A. Horton, J.L. TESTING OF THERMOCOUPLES FOR INHOMOGENEITIES: A REVIEW OF THEORY, WITH EXAMPLES
Temperature, It's Measurement and Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 5, parte 2, 923-931, New York, 1982.
- /76/ ASTM INDUSTRIAL RESISTANCE THERMOMETERS
ASTM E 644-78, American National Standard, 1978.
- /77/ Murata PLATINUM SENSORS FOR TEMPERATURE MEASUREMENT
Murata Elektronik GMBH & Co. Handels KG, Germany, 1989.
- /78/ Goldratt, E. Yeshurum, Y. Greenfield, A.J. EFFECT OF HEAT LEAKS IN PLATINUM RESISTANCE THERMOMETRY
Rev. Sci. Inst., American Institute of Physics, Vol. 51, nº 3, 361-364, 1980.

- /79/ Dutt, M. PRACTICAL APPLICATION OF PLATINUM RESISTANCE SENSORS
Temperature, It's Measurement and Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 4, parte 2, 1013-1019, New York, 1972.
- /80/ CERTI QUALIFICAÇÃO E CERTIFICAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO (CALIBRAÇÃO/AFERIÇÃO)
CERTI, Florianópolis, 1992.
- /81/ França, L.R.G.
Flesch, C.A.
Schneider, C.A. PROPOSTA DE UM SISTEMA PARA ESTABELECIMENTO DO TAMANHO DOS INTERVALOS DE CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE CONTROLE GEOMÉTRICO
XI Congresso Bras. de Eng. Mec.: 687-689, São Paulo, 1991.
- /82/ OIML GUIDELINES FOR THE DETERMINATION OF RECALIBRATION INTERVALS OF MEASURING EQUIPMENT USED IN TESTING LABORATORIES
International Document nº 100, 1-6, 1984.
- /83/ Waeny, J.C.C. V OTIMIZAÇÃO DE CICLOS DE VALIDAÇÃO
Seminário da ABCQ, São Paulo, Outubro, 1987.
- /84/ Greb, D.J. CALIBRATION INTERVALS SPECIFICATION AND INSTRUMENT QUALITY
Journal of Quality Technology, Vol. 11, nº 2, 88-94, A. Blanton Goldfrey, 1979.
- /85/ Glassman, J. INTERVALS BY EXCEPTION
NBS Special Publication 335, National Bureau of Standards, 65-72, 1971.
- /86/ Greb, D.J. OPTIMIZING CALIBRATION INTERVALS
NBS Special Publication 335, National Bureau of Standards, 73-80, 1971.
- /87/ França, L.R.G. SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE INSTRUMENTOS DE CONTROLE GEOMÉTRICO: CARACTERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO
Dissertação de Mestrado, UFSC, 1993.

- /88/ Shikama, T.
Tanabe, T.
Fujitsuka, M.
Yoshida, H.
Watanabe, R.
DETERIORATION ELECTROMOTIVE FORCE OF
CHROMEL-ALUMEL THERMOCOUPLES IN
REDUCING ATMOSPHERES AT HIGH
TEMPERATURE
Metallurgical Transactions,
American Soc. for Metals and the
Metallurgical Society of AIME,
Vol. 13a, 167-172, 1982, ISBN 0360-
2111133/82/0111-0167300 75/0.
- /89/ Kollie, T.G
Horton, J.L
Carr, K.R.
Herskovitz, M.B.
Mossman, C.A.
TEMPERATURE MEASUREMENT ERRORS WITH
TYPE K(CHROMEL VS ALUMEL)DUE TO SHORT-
RANGED ORDERING IN CROMEL
Rev. Sci. Inst., Vol. 46, n° 11, 1447-
-1461, 1975.
- /90/ Bentley, R.E.
Jones, T.P.
INHOMOGENEITIES IN TYPE S
THERMOCOUPLES WHEN USED TO 1064 °C
High Temperature - High Pressure,
Vol. 12, 33-45, 1980.
- /91/ Pavlov, R.P.
Dobrovinskii, I.E.
INTERVALS BETWEEN CHECKS FOR
INDIVIDUALLY CALIBRATED CA AND CC
THERMOCOUPLES
Meas. Techniques, Plenum Publ. Corp.,
919-922, 1991.
- /92/ McLaren, E.H.
Murdock, E.G.
PROPERTIES OF SOME NOBLE AND BASE
METAL THERMOCOUPLES AT FIXED POINTS IN
THE RANGE 0-1000 °C
Temperature, It's Measurement and
Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 5,
parte 2, 953-975, New York, 1982.
- /93/ Walker, B.E.
Ewing, C.T.
Miller, R.R.
THERMOELECTRIC INSTABILITY OF SOME
NOBLE METAL THERMOCOUPLES AT HIGH
TEMPERATURE
Rev. Sci. Inst., Vol. 33, n° 10,
1029-1040, 1972.
- /94/ Anderson, R.L.
Lyons. J.D.
Kollie, T.G.
Christie, W.H.
DECALIBRATION OF SHEATHED
THERMOCOUPLES
Temperature, It's Measurement and
Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 5,
parte 2, 977-1007, New York, 1982.
- /95/ Saffell, J.R.
DESIGNING ACCURATE PLATINUM RTD
MEASURING SYSTEMS FOR INDUSTRY
Temperature, It's Measurement and
Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 5
parte 2, 733-738, New York, 1982.

- /96/ Jung, H.J.
Nubbemeyer, H. THE STABILITY OF COMMERCIALY AVAILABLE HIGH TEMPERATURE PLATINUM RESISTANCE THERMOMETERS OF A 5 Ω SILICA CROSS TYPE UP TO 961,93 °C
Temperature, It's Measurement and Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 5, parte 2, 763-770, New York, 1982.
- /97/ Vasil'ev, E.V. STUDY OF THE STABILITY OF SERIAL, PLATINUM, SENSITIVE ELEMENTS IN NARROW TEMPERATURE RANGES
Meas. Techniques, Plenum Publishing Corp., 1105-1109, 1988.
- /98/ Razhba, Y.E.
Razhba, I.A. TRIPLE POINT OF GALLIUM USED TO CALIBRATE LOW-TEMPERATURE PLATINUM RESISTANCE THERMOMETERS.
Meas. Techniques, Plenum Publ. Corp., 466-468, 1991.
- /99/ Peng, L.
Besley, L.M. THE CHARACTERISTICS OF CHINESE ENCAPSULATED RHODIUM-IRON RESISTANCE THERMOMETERS
Meas. Sci. Technol, Iop Publisching ltd., Vol. 2, 1991.
- /100/ Cooper, M.H.
Anderson, R.L.
Mossman, C.A. AUTOMATED TEMPERATURE MEASUREMENTS FROM -183 TO 2300 °C
Temperature, It's Measurement and Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 5, parte 2, 1287-1292, New York, 1982.
- /101/ Hudson, R.P. MEASUREMENT OF TEMPERATURE
Rev. Sci. Instr., Vol. 51, n° 7, 871-880, 1980.
- /102/ Kennedy, R.H. SELECTING TEMPERATURE SENSORS
Chemical Eng., 54-71, 1983.
- /103/ McAllan, J.V. PRACTICAL HIGH TEMPERATURE RESISTANCE THERMOMETRY
Temperature, It's Measurement and Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 5, parte 2, 789-794, New York, 1982.
- /104/ Mangum, B.U.
Evans, G.A. Jr. INVESTIGATION OF STABILITY OF SMALL PLATINUM RESISTANCE THERMOMETERS
Temperature, It's Measurement and Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 5, parte 2, 795-801, New York, 1982.

- /105/ LaMers, T.H.
Zurbuchen, J.M.
Trolander, H.
ENHANCED STABILITY IN PRECISION
INTERCHANGEABLE THERMISTORS
Temperature, It's Measurement and
Control in Sci. and Ind., ISA, Vol. 5,
parte 2, 889-896, New York, 1982.
- /106/ Histoshi, K.
MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MELHORIA DA
QUALIDADE
Association for Overseas Technical
Scholarship, Japan, 1988.
- /107/ Camarano, D.M.
Martins, A.S.
MANUAL DO USUÁRIO DO SISTEMA DE
SELEÇÃO
Florianópolis, setembro, 1993.
- /108/ ISO
GUIDE TO THE EXPRESSION OF UNCERTAINTY
IN MEASUREMENT
ISO/Tag 4/WG, International
Organization for Stand., 1ª ed., junho,
1992.